ББК 31.261
И 88
~~УДК 621.314~~
6П2.1.081

Н. В. Астахов, Е. М. Лопухина, В. Т. Медведев, И. Л. Осин,
Г. А. Семенчуков, Г. С. Сомихина, | А. Я. Титунин |, Ф. М. Юферов

Рецензенты: кафедра электрических машин Ленинградского политехнического института им. М. И. Калинина (зав. кафедрой — д-р техн. наук, проф. В. В. Романов); проф. А. В. Корицкий (Московский институт радиоэлектроники и автоматики).

Испытание электрических микромашин: Учеб. пособие для электротехн. спец. втузов/Астахов Н. В., Лопухина Е. М., Медведев В. Т. и др.; Под ред. Н. В. Астахова. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 1984. — 272 с., ил.
И 88

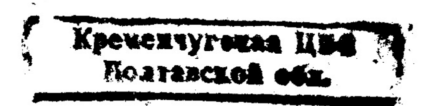
В пер.: 90 к.

Рассматриваются общие вопросы методики испытания и моделирования, лабораторные исследования электрических микромашин общего назначения и автоматических устройств. Излагаются элементы теории, необходимые для более глубокого анализа экспериментальных данных. Книга содержит элементы программированного обучения.

Второе издание (первое вышло в 1973 г.) значительно переработано и дополнено.

И $\frac{2302030000-537}{001(01)-84}$ 124—85

ББК 31.261
6П2.1.081



ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящая книга является вторым, значительно переработанным, расширенным и дополненным новым материалом изданием учебного пособия «Испытание электрических микромашин», вышедшего в свет в 1973 г. По сравнению с первым во втором издании отражены развитые за последние годы и вновь разработанные методы испытаний, позволяющие более полно исследовать статические и динамические характеристики микромашин и их виброакустические свойства. Авторы стремились стимулировать развитие навыков самостоятельной работы и интерес к углубленным экспериментальным исследованиям с использованием АВМ и ЭВМ.

Учитывая многообразие типов микромашин и большое различие предъявляемых к ним требований, авторы в вводной части каждого параграфа приводят краткое описание устройства, принципа действия и основных свойств исследуемой машины.

В программах испытаний основное внимание уделяется исследованию физических процессов, протекающих в микромашинах, снятию выходных характеристик, оценке энергетических показателей и погрешностей. Большое значение придается критическому анализу результатов экспериментального исследования. Приведены примеры обобщения результатов исследования методом планирования эксперимента. Специальные разделы посвящены опытному определению параметров микромашин, исследованию их виброакустических и динамических показателей. По каждому типу машин приводятся вопросы для самопроверки.

Книга предназначается для студентов электротехнических специальностей вузов. Она может быть полезна специалистам, разрабатывающим и эксплуатирующим электрические микромашины. В зависимости от факультета и специальности отдельные пункты программ испытаний выполняются по указанию преподавателя, причем объем исследований может быть рассчитан на четырех- или двухчасовое занятие. В программах работ содержатся пункты, которые можно использовать и для учебно-исследовательских работ.

Книга отражает многолетний опыт работы преподавателей со студентами факультетов электромеханического, автоматики и вычислительной техники, электрификации и автоматизации промышленности и транспорта в лаборатории электрических микромашин МЭИ.

Работа между авторами распределялась следующим образом: проф. Н. В. Астаховым написаны предисловие, введение, гл. 7; доц. Е. М. Лопухиной — гл. 1 и 4, § 5.1, 5.2, 8.1, 10.3; доц. В. Т. Медведевым — § 12.1; доц. И. Л. Осиным — гл. 13—15, § 6.1, 10.2; доц. Г. С. Сомихиной — § 8.2 и 9.2; ст. преп. А. Я. Титуниным — § 9.4; проф. Ф. М. Юферовым — § 5.3, 6.3, 9.3.

Совместно: Н. В. Астаховым и В. Т. Медведевым написаны гл. 3 и § 12.2; Е. М. Лопухиной и Г. А. Семенчуковым — § 10.1, гл. 11; В. Т. Медведевым и Г. С. Сомихиной — гл. 2; И. Л. Осиным и Г. С. Сомихиной — § 6.2; Г. А. Семенчуковым и Г. С. Сомихиной — § 9.1.

Сердечную признательность авторы выражают рецензентам: проф. Московского института радиоэлектроники и автоматики А. В. Корицкому и преподавателям Ленинградского политехнического института — доц. Е. Д. Несговоровой, ст. преп. А. П. Борисову, ст. преп. А. А. Пухову и асс. Ю. Ф. Кокунову — за ценные замечания и советы, сделанные ими при просмотре рукописи.

Авторы с благодарностью примут все критические замечания по содержанию книги, которые следует направлять по адресу: *101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., д. 29/14, издательство «Высшая школа».*

Авторы

ВВЕДЕНИЕ

В реализации Энергетической и Продовольственной программ СССР электрические микромашины имеют определенное значение. Они широко применяются в народном хозяйстве — промышленности, сельском хозяйстве, специальных областях техники, быту. Все увеличивающаяся потребность в микромашинах для многих устройств автоматики, телемеханики, связи, промышленной электроники, счетно-решающей и измерительной техники, предметов повседневного спроса привела к тому, что подотрасль микроэлектромашиностроения растет динамично и ее темпы роста опережают темпы роста электромашиностроения в целом. Все виды микромашин условно можно разделить на две группы: микромашины автоматических устройств и микромашины общего назначения.

В автоматических линиях, в промышленных роботах, в приборах измерения и управления применяется большое число неуправляемых и управляемых двигателей, информационных машин (тахогенераторов, вращающихся трансформаторов, сельсинов и др.). Значение микромашин автоматических устройств особенно велико при решении задач комплексной механизации и автоматизации производственных процессов, так как они являются основой автоматизированных электроприводов **высокой точности.**

Наиболее массовыми являются микромашины общего назначения, к которым относятся и бытовые — преимущественно двигатели: асинхронные, синхронные, универсальные коллекторные, используемые для привода холодильников, стиральных машин, пылесосов, аппаратов звукозаписи, приборов микроклимата. Машины общего назначения выпускаются более чем на ста заводах Министерства электротехнической промышленности. Создана первая в мире единая серия бытовых асинхронных микродвигателей, охватывающая более сорока типоисполнений, потребность в которых исчисляется десятками миллионов штук в год.

В Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1981—1985 годы и на период до 1990 года предусматривается не только увеличение объемов выпуска микромашин, но и дальнейшее повышение их технического уровня. В создании электрических микромашин с высокими энергетическими и другими выходными показателями, надежных при минимальных затратах материалов, большое значение имеют экспериментальные исследования и испытания. Испытания микромашин характеризуются рядом особенностей. В частности, при испытаниях микромашин измеряются малые величины, при этом измерительные устройства и приборы могут потреблять мощности, сравнимые с измеряемыми. Поэтому в этих случаях необходимо применять специальные приборы и учитывать собственное потребление.

В микромашинах нагревание обмоток более существенно влияет на характеристики и выходные показатели, а поэтому испытания следует проводить по возможности при одной и той же температуре и контролировать ее.

Указанные причины обусловливают отличие методики испытания электрических микромашин от методики испытания машин средней и большой мощности.

В последнее время появился ряд новых ГОСТов по микромашинам: ГОСТ 23375—78 «Машины электрические малой мощности. Условные обозначения», регламентирующий термины, определения и буквенные обозначения параметров; ГОСТ 16264—78 «Электродвигатели малой мощности общего назначения. Общие технические условия», в котором рассматриваются методы испытания микромашин. Кроме того, методы испытания оговариваются в ГОСТах по отдельным типам микродвигателей: однофазным конденсаторным (ГОСТ 10799—77), для активаторов бытовых стиральных машин (ГОСТ 14789—80Е), для бытовых вентиляторов (ГОСТ 17018—79Е), для звукозаписывающей аппаратуры и электропроигрывающих устройств (ГОСТ 14191—81), для ручного электрического инструмента (ГОСТ 10085—80), универсальных коллекторных (ГОСТ 10800—77Е) и др. При проведении испытаний важно убедиться в том, что показатели отдельных типов микромашин соответствуют требованиям ГОСТов.

Современные испытания включают в себя определение не только выходных характеристик образцов микромашин, но и их параметров, а также моделирование на АВМ и расчетных столах. Моделирование позволяет выявить влияние параметров на статические и динамические свойства машин и сократить объем макетных испытаний при их разработке. Эффективность экспериментальных исследований как при их постановке, так и при обработке результатов повышается с использованием методов планирования эксперимента и ЭВМ.

Особое место при испытаниях микромашин принадлежит определению их виброакустических свойств, являющихся важными экологическими факторами, влияющими на производительность труда и здоровье людей.

На ряде заводов и в НИИ ведутся большие работы по автоматизации испытаний микромашин, которая позволяет расширить объем и углубить программы испытаний, повысить точность измерений, сократить время, затрачиваемое на них и на разработку изделий в целом. В ближайшие годы будут продолжаться работы по созданию измерительных комплексов и автоматизированных систем для испытаний микромашин в производственных и лабораторных условиях, позволяющих определять требуемые выходные показатели и управлять уровнем качества.

Раздел первый
МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ МИКРОМАШИН

Глава 1
ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

§ 1.1. ИЗМЕРЕНИЕ ТОКА, НАПРЯЖЕНИЯ И МОЩНОСТИ

При исследовании микромашин приходится одновременно измерять токи, напряжения и мощности. При этом неизбежны погрешности за счет собственного потребления приборов. Эти погрешности тем более заметны, что измеряемые величины при испытании микромашин, особенно переменного тока, близки к порогу чувствительности обычных приборов. Поэтому для точных испытаний приходится, во-первых, применять специальные приборы, во-вторых, исключать погрешности внесением поправок на собственное потребление мощности приборами и, в-третьих, выбирать такую схему включения измерительных приборов, которая позволит свести к минимуму влияние собственного потребления.

При измерениях в однофазных схемах возможны 18 вариантов включения амперметра, вольтметра и ваттметра. Из них предпочтительны две схемы (рис. 1.1), в которых погрешность при измерении мощности вносится за счет падения напряжения в сопротивлении амперметра и токов цепи ваттметра, напряжение измеряется непосредственно на испытуемом двигателе, а измеряемый ток равен току испытуемого двигателя (потребление мощности вольтметром мало). Собственное потребление вольтметра можно измерить ваттметром при отключении испытуемого двигателя.

При испытании двигателей напряжением 110 В, если падение напряжения в амперметре и токовой цепи ваттметра составляет около 2 В, погрешность измерения мощности равна приблизительно 1,5%, что можно считать допустимым.

При напряжениях, больших 110 В, и токах нагрузки, меньших пределов измерения амперметров и ваттметров, погрешность будет еще ниже. При напряжениях, меньших 110 В, погрешность в измерении мощности увеличивается; в таких случаях ее следует учитывать, вводя в результат измерения соответствующие поправки.

При исследованиях микродвигателей всегда следует оценивать погрешность при измерении мощности и в случае необходимости вводить поправку на собственное потребление приборов, равную для схем, приведенных на рис. 1.1,

$$P_п = I^2 (R_A + R_W), \qquad (1.1)$$

где I — ток; R_A, R_W — сопротивление амперметра и токовой цепи ваттметра.

При измерениях в трехфазных схемах приборы включаются аналогично, т. е. вольтметр включается на выводы испытуемой машины, а обмотка напряжения ваттметра — на сеть. Для измерения мощности применяется ваттметр с ваттметровым переключателем, для измерения тока — два амперметра. Для точных исследований иногда приходится включать балластные сопротивления (индуктивные и активные) в те фазы, где отсутствуют амперметр и токовая цепь ваттметра, во избежание несимметрии напряжения из-за больших падений напряжения в сопротивлениях амперметра и токовой цепи ваттметра, которые для токов 0,5—2 А бывают значительными.

При переключении приборов с одной фазы на другую балластное сопротивление также должно быть соответственно переключено.

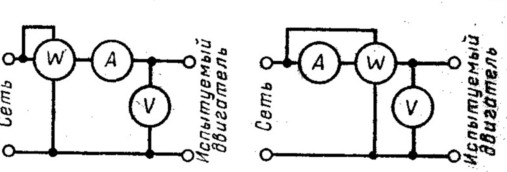


Рис. 1.1. Схемы для одновременного измерения тока, напряжения, мощности

Желательно все электрические величины измерять одновременно и так выбирать пределы измерения, чтобы стрелки приборов находились в правой половине шкалы. При измерении тока до 1 А рекомендуется пользоваться выпрямительными приборами, у которых по сравнению с другими потребление мощности значительно меньше. Кроме того, эти приборы многопредельные (например, 100—250—1000 мА) и, следовательно, позволяют исследовать различные режимы работы машины. Нижним пределом для электромагнитного и электродинамического амперметров можно считать 100 мА (по номинальному значению шкалы), но на этом пределе относительно велико потребление мощности. Для измерения токов свыше 1 А можно пользоваться стандартными амперметрами, как электромагнитными, так и электродинамическими, с пределами 2,5—5,0 и 5—10 А. Падение напряжения на них при номинальном токе не должно превышать 0,5—0,7 В.

Напряжения рекомендуется измерять такими вольтметрами, у которых можно пренебречь собственным потреблением мощности (сопротивление вольтметра должно быть не меньше 500—1000 Ом/В). Таким условиям удовлетворяют электронные и выпрямительные вольтметры. Выпрямительные приборы обладают большей точностью, а электронные имеют меньшее собственное потребление. В последнее время для исследований, где необходима бóльшая точность, применяются цифровые вольтметры.

При измерении мощности следует выбирать приборы, у которых незначительны собственное потребление мощности и фазовая погрешность при значениях $\cos\varphi = 0{,}2 \div 1{,}0$. Желательно иметь ваттметр с большим числом пределов измерений по току и напряжению для использования одного и того же прибора при измерении мощности испытуемой машины в различных режимах. Для номинальных токов свыше 0,5 А может быть рекомендован электродинами-

ческий ваттметр. При токах, меньших 0,5 А, пользуются специальными ваттметрами, например электродинамическими с низким $\cos\varphi$ и электронными. Для измерения мощности машин переменного тока в несколько ватт можно воспользоваться электронным осциллографом *ЭО* (рис. 1.2). При этом мощность определяется с помощью фигур Лиссажу по значению $\sin\varphi$. На одну пару пластин осциллографа подается напряжение U_I, пропорциональное току цепи, в которой измеряется мощность, для чего в цепь включается небольшое активное сопротивление r. На другую пару пластин по-

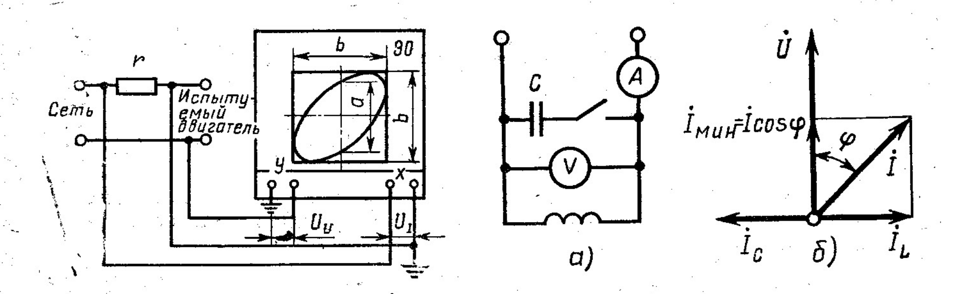


Рис. 1.2. Схема для измерения мощности с помощью электронного осциллографа

Рис. 1.3. Схема для измерения мощности (*а*) и векторная диаграмма (*б*)

дается напряжение U_U этой цепи или величина, пропорциональная ему. Усиления по осям x и y подбираются так, чтобы отклонения по обеим осям были одинаковыми. На экране осциллографа появляется фигура Лиссажу, в общем случае (при синусоидальных напряжениях) имеющая вид эллипса. Тогда

$$\sin\varphi = a/b. \quad (1.2)$$

Величины a и b показаны на рис. 1.2.

Практически величину b устанавливают по вертикали при отсутствии напряжения на пластинах x, затем, не меняя усиления по оси y, подают напряжение на пластины x и измеряют отрезок a по вертикальной оси.

Для измерения мощности можно также использовать переменную емкость (рис. 1.3). Идея этого способа измерения мощности основана на компенсации индуктивного тока исследуемой цепи емкостным током. Минимальный ток амперметра, измеряющего сумму индуктивного и емкостного токов, будет чисто активным: $I_{мин}=I_а$. При выключении емкости амперметр покажет полный ток I:

$$\cos\varphi = I_{мин}/I. \quad (1.3)$$

При этом мощность цепи

$$P = UI_{мин}. \quad (1.4)$$

§ 1.2. СНЯТИЕ КРИВЫХ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА. ОЦЕНКА ХАРАКТЕРА ПОЛЯ

В ряде случаев при исследовании микромашин интерес представляет не только измерение напряжения и тока, но и снятие формы кривых U и I. Для этой цели можно использовать электронный осциллограф. Исследуемый сигнал подается на вертикальные пластины осциллографа между выводами «Вход» и «Земля». Ручками декадного усилителя «Ослабление» (начиная с ослабления 1 : 100) и регулировкой чувствительности «Усиление» на экране устанавливается изображение, удобное для рассмотрения. С учетом частоты исследуемого сигнала переключателем «Диапазоны частот» и ручкой «Частота плавно» подбирается такая частота развертки, при которой на экране устанавливается один или несколько периодов наблюдаемых колебаний. Выбирается род синхронизации развертки: чаще внутренняя или от сети. Ручка «Амплитуда синхронизации» вращается до установления неподвижного изображения на экране, при этом может потребоваться плавная подстройка частоты развертки ручкой «Частота плавно».

Масштаб измеряемого напряжения определяется с помощью контрольного сигнала переменного тока, который подается на вертикальные пластины при том же усилении, что и исследуемое напряжение. Значение контрольного сигнала равно 2,4 В, а его частота составляет 50 Гц.

Форма кривых напряжения и тока может быть получена также с помощью шлейфового осциллографа. При испытаниях асинхронных и синхронных конденсаторных двигателей интерес представляет оценка характера поля в машине с помощью электронного осциллографа. Для этого следует подать на вертикальный и горизонтальный входы осциллографа токи фаз или пропорциональные им величины, например напряжения с соответствующих амперметров.

Так как исследуются асинхронные и синхронные двухфазные двигатели, у которых оси обмоток статора сдвинуты в пространстве на электрический угол 90°, то круговое поле в машине получится при условии равенства МДС обмоток $I_A w_A k_{oA} = I_B w_B k_{oB}$, т. е. при $I_A = kI_B$ (токи в фазах должны быть обратно пропорциональны эффективному числу витков), и сдвиге токов во времени на электрический угол 90°. Таким образом, усиление по обеим осям должно отличаться в k раз (k — коэффициент трансформации*). Если в машине образуется круговое поле, то отклонения по осям x и y будут одинаковыми и на экране осциллографа появится окружность. Если $I_A/I_B \neq k$ или угол сдвига токов по фазе во времени отличается от 90°, то на экране появится эллипс. О степени эллиптичности поля можно судить по соотношению его осей.

---

* Термин «коэффициент трансформации» здесь и в дальнейшем применяется условно — для обозначения соотношения эффективных витков обмотки статора $k = w_B k_{oB}/(w_A k_{oA})$.

§ 1.3. ИЗМЕРЕНИЕ АКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ И ПРЕВЫШЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБМОТОК

Сопротивления обмоток согласно ГОСТ 11828—75 измеряют одним из двух методов: а) с помощью моста постоянного тока; б) с помощью вольтметра и амперметра при постоянном токе.

Сопротивления обмоток обычно измеряют непосредственно на выводах обмоток, а у коллекторных машин для замкнутых обмоток якоря — на пластинах коллектора между точками, доступными для присоединения измерительного устройства и выбираемыми в соответствии с типом обмотки.

Значение постоянного тока при измерении сопротивлений обмоток должно быть таким, чтобы адиабатное повышение температуры исследуемой обмотки $\Delta\Theta$ за время измерения не превышало 1° С. Для обмоток из медного провода адиабатное повышение температуры (°С/с)

$$\Delta\Theta = j^2/200, \qquad (1.5)$$

где j — плотность тока в обмотке, А/мм².

Для алюминиевых обмоточных проводов вместо 200 в знаменателе (1.5) следует подставить 86. Если сечение обмоточного провода неизвестно, то значение измерительного тока не должно превосходить 15—20% от номинального тока данной обмотки, а длительность его протекания — 1 мин.

Если сопротивление вольтметра, включаемого непосредственно на измеряемую обмотку, отличается от ее сопротивления $r_{изм}$ менее чем в 100 раз, то

$$r_{изм} = U/(I - U/r_V), \qquad (1.6)$$

где U, I — измеренные напряжение и ток, В и А; r_V — сопротивление вольтметра, Ом.

Для определения сопротивления обмоток применяются также измерители активных сопротивлений с цифровой индикацией — цифровые омметры.

Превышение температуры обмотки машины над температурой окружающей среды определяют методом сопротивления. При этом возрастание сопротивления обмотки при постоянном токе в нагретом состоянии находится относительно практически холодного состояния. Метод сопротивления позволяет определить среднее значение температуры.

Перед включением машины на напряжение измеряют сопротивление обмотки практически в холодном состоянии r_x и температуру окружающей среды $\vartheta_{о.х}$. Рекомендуется провести два или три измерения и определить среднеарифметическое значение сопротивления. Затем машину включают на номинальное напряжение и выдерживают в номинальном режиме до достижения установившегося теплового режима, о чем свидетельствует постоянство сопротивления обмотки. Для конденсаторных двигателей превышение температуры следует измерять в режиме холостого хода, как наи-

более напряженном в тепловом отношении. При установившемся тепловом режиме измеряют сопротивление обмотки в горячем состоянии $r_г$ и температуру окружающей среды $\vartheta_{о.г}$. Превышение температуры обмотки (°С)

$$\theta = \frac{r_г - r_х}{r_х}(k + \vartheta_{о.х}) + (\vartheta_{о.х} - \vartheta_{о.г}), \tag{1.7}$$

где k — коэффициент, равный 235 для обмотки из медных проводов и 245 — из алюминиевых.

Если температура окружающей среды при измерении сопротивлений обмотки $r_х$ и $r_г$ одинакова, то формула (1.7) упрощается, так как последний член $\vartheta_{о.х} - \vartheta_{о.г} = 0$. Сопротивление обмотки желательно измерять, не отключая машину от сети. Если сопротивление обмотки постоянному току измеряют у обесточенных машин, то либо его осуществляют быстро (за время, не превышающее 3 с), либо строят кривую остывания машины во времени: $\lg \theta = f(t)$. Действительное значение превышения температуры обмотки определяют путем экстраполяции этой кривой (рис. 1.4). При снятии кривой остывания одновременно с отключением машины от питающей сети включают секундомер и быстро измеряют сопротивления через каждые 10—15 с. Обычно производят не менее пяти измерений. Следует о с о б о о т м е т и т ь одно обстоятельство: так как в электрических микромашинах влияние активных сопротивлений обмоток на выходные характеристики очень велико, то важно знать, при какой температуре обмоток измерены отдельные показатели. Для этого необходимо контролировать значения сопротивления обмотки в момент измерения данного показателя.

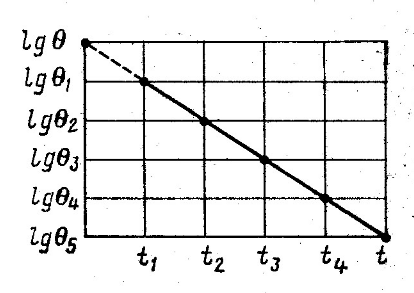


Рис. 1.4. Кривая остывания машины

Вопросы для самопроверки

1. Назовите особенности методики испытания микромашин.
2. По каким соображениям выбирается схема включения приборов для одновременного измерения напряжения, тока, мощности?
3. Какие типы приборов рекомендуются для измерения напряжения, тока, мощности?
4. Как при измерении электрических величин учитываются погрешности, вносимые приборами?
5. Какие способы применяются для измерения мощности и $\cos\varphi$ в микромашинах?
6. Какими методами измеряется активное сопротивление обмоток электрических микромашин?
7. Как определить превышение температуры обмоток электрических микромашин над температурой окружающей среды?
8. Какое влияние оказывает нагревание электрических микромашин при снятии характеристик?

Глава 2

ИЗМЕРЕНИЕ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

§ 2.1. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ВРАЩАЮЩИХ МОМЕНТОВ

Рабочие характеристики электрических микромашин снимаются методом непосредственного нагружения машин с одновременным измерением момента и частоты вращения. Точность определения КПД η и полезной мощности P_R зависит от точности измерения вращающего момента M и частоты вращения n, так как $P_R = f(M, n) \equiv \equiv Mn$. Косвенные методы определения рабочих характеристик нецелесообразны, так как погрешности измерений косвенными методами соизмеримы с величинами, характеризующими испытуемый объект [18].

При проектировании, производстве и испытании электрических машин возникает необходимость в определении пусковых, максимальных и минимальных моментов у асинхронных и синхронных машин; моментов входа в синхронизм у синхронных машин.

Моментомеры должны удовлетворять требованиям, предъявляемым к ним: иметь малые погрешности в широком диапазоне измерений при частоте вращения от 0 до 40 000 об/мин; обладать малой инерционностью в любых условиях эксплуатации; обеспечивать стабильность нагрузочного момента при изменении температуры окружающей среды; в кривой момента устройства недопустимо наличие гармонических составляющих.

Разнообразие конструктивных исполнений микромашин, их характеристик и диапазона измерения вращающего момента является причиной отсутствия серийных устройств (моментомеров) для измерения моментов. На различных предприятиях разрабатываются и изготовляются моментомеры применительно к определенному типу машин.

Основой прямых методов измерения вращающих моментов (рис. 2.1) является анализ уравнения движения

$$M = M_{нагр} + M_{дин} = M_{нагр} + J d\Omega/dt, \qquad (2.1)$$

где M — вращающий момент на валу двигателя; $M_{нагр}$ — внешний момент сопротивления приводимого во вращение механизма; $M_{дин}$ — динамический момент, пропорциональный энергии вращающихся масс.

Анализ уравнения (2.1) показывает, что измерение момента можно осуществить одним из прямых методов:

а) статическим методом, когда $M_{дин} = 0$, а $M_{нагр} = \text{const}$;

б) динамическим методом при разгоне двигателя, когда можно допустить, что $M_{нагр} = \text{const}$ (в частности, $M_{нагр} \approx 0$) во всем рабочем диапазоне;

в) суммарным методом, измеряя суммарный момент (по реакции статора испытуемой машины).

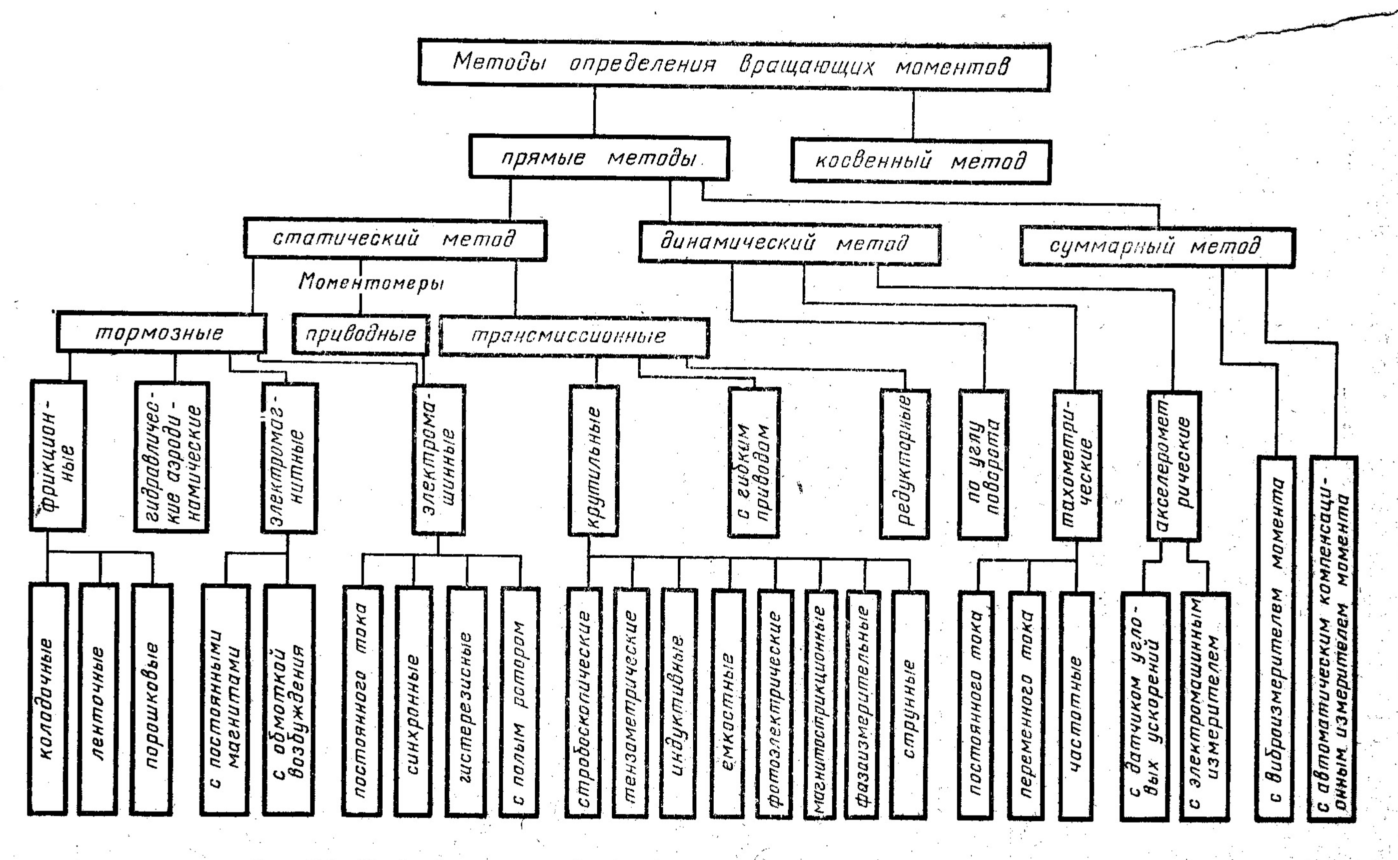


Рис. 2.1. Классификационная схема методов измерения вращающих моментов

На рис. 2.1 схематично представлена классификация методов измерения и конструктивных разновидностей моментомеров.

В зависимости от решаемых задач целесообразно пользоваться различными моментомерами:

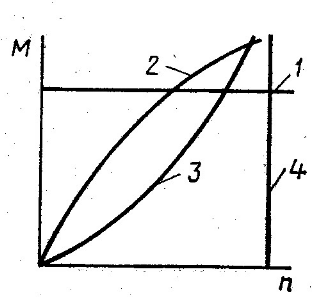


Рис. 2.2. Механические характеристики различных тормозных устройств:

1 — фрикционные; *2* — динамические; *3* — гидродинамические и аэродинамические; *4* — синхронные

а) при проведении лабораторных (контрольных) измерений — моментомерами с высокой точностью (погрешность 0,2—0,5%);

б) при массовом контроле — многопредельными моментомерами, обладающими высоким быстродействием и точностью 1,0—2,5%;

в) при типовых испытаниях — моментомерами, которые обладают высокой надежностью при работе в условиях высокого вакуума, агрессивной среды, повышенных вибровлаготермоперегрузках.

Большое значение для моментомеров имеет вид механической характеристики $M=f(n)$. На рис. 2.2 представлены механические характеристики различных тормозных устройств. Область применения моментомера определяется диапазоном измеряемых моментов и областью устойчивой работы тормоза. В свою очередь, диапазон измеряемых моментов определяется типом применяемого измерителя.

§ 2.2. ТОРМОЗА-МОМЕНТОМЕРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВРАЩАЮЩИХ МОМЕНТОВ

Здесь рассматриваются тормоза-моментомеры, получившие широкое распространение при испытаниях электрических машин.

Фрикционный тормоз. Наиболее прост в конструктивном отношении фрикционный тормоз. Тормозной момент в таком тормозе создается за счет сил трения при взаимном перемещении трущихся элементов. Идеальная характеристика $M=f(n)$ представлена на рис. 2.3, *а*. Реальные тормоза имеют характеристики, зависящие от частоты вращения (рис. 2.3, *б*), температуры, состояния рабочих поверхностей, удельного давления и т. п. Экспериментально доказано, что наибольшее влияние на коэффициент трения оказывает температура трущихся тел. Под воздействием $T=\text{var}$ изменяются механические свойства материала по глубине, что ведет к неустойчивой работе тормоза.

Фрикционные тормоза следует применять при исследовании машин полезной мощностью не более 10 Вт и частотой вращения $n \leqslant 3000$ об/мин.

На рис. 2.4 приведены разновидности фрикционных тормозов. Момент, определяемый с помощью тормоза с пружинным динамо-

метром (рис. 2.4, *а*), $M=(F-Q)r$, где F — показания динамометра, Н; Q — сила тяжести груза, Н; r — радиус шкива, м.

Аналогично определяется момент с помощью тормозов Томпсона и Прони (рис. 2.4, *б, в*): $M=Ql$, где l — плечо приложения силы тяжести Q.

При испытании машин на срок службы применяются тормоза, в которых в барабан насыпается дробь (рис. 2.4, *г*). Изменением радиуса барабана и количества дроби регулируют пределы измерений тормозного момента. Особой разновидностью фрикционных тормозов являются порошковые электромагнитные тормоза, принцип действия которых основан на механомолекулярном взаимодействии в магнитном поле различных ферромагнитных порошков, помещенных в пространство между подвижной и неподвижной частями. Такие тормоза целесообразно применять при исследовании тихоходных машин.

Фрикционные нагрузочные устройства имеют ряд таких недостатков, как возникновение релаксационных колебаний (скачки при трении), неоднозначность нагрузочных характеристик; малый срок службы вследствие износа, затрудненный отвод теплоты и др., из-за которых в настоящее время они вытесняются электродинамическими, электромагнит-

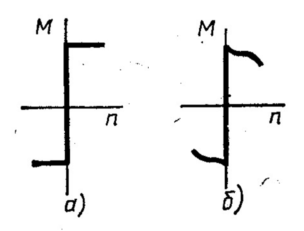


Рис. 2.3. Механические характеристики фрикционного тормоза

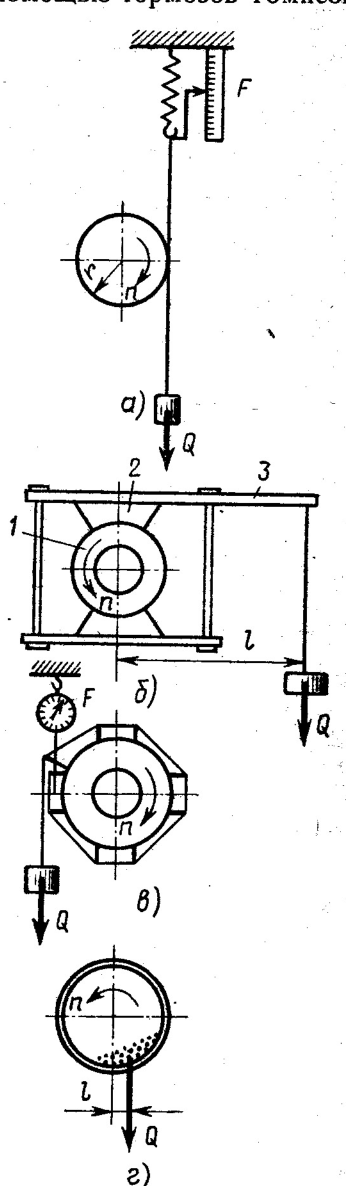


Рис. 2.4. Схемы фрикционных тормозов:

1 — тормоз; *2* — опора; *3* — кронштейн

ными и другими типами тормозных устройств. Однако для исследования машин полезной мощностью до 10 Вт достаточно широко используются фрикционные тормоза маятникового типа (рис. 2.5).

Нагрузка испытуемого двигателя осуществляется натяжением шнура, охватывающего шкивы тормоза и двигателя. Маятник

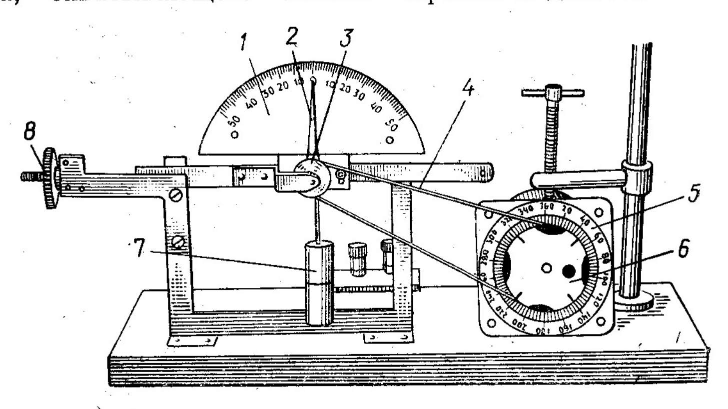


Рис. 2.5. Маятниковый (ленточный) тормоз:

1 — шкала; *2* — стрелка; *3* — шкив тормоза; *4* — натяжной шнур; *5* — испытуемый двигатель; *6* — шкив двигателя; *7* — маятник; *8* — гайка

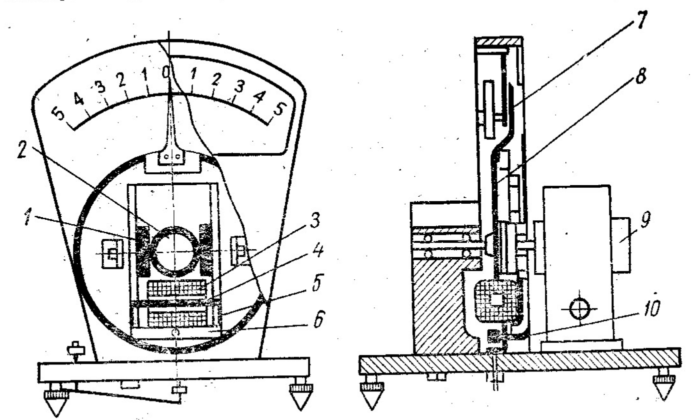


Рис. 2.6. Фрикционный моментомер с электромагнитным регулированием:

1 — колодки; *2* — шкив; *3* — обмотка возбуждения электромагнита; *4* — магнитопровод; *5* — крепежные пластины; *6* — поворотная перекладина; *7* — стрелка; *8* — диск; *9* — испытуемый двигатель; *10* — ось

жестко связан со стрелкой и уравновешивает силу трения между шкивом и шнуром. Вращающий момент определяется по углу отклонения стрелки на шкале. Установка пределов производится сменой шкивов и изменением значения и положения груза. Натяжение шнура осуществляется гайкой [1].

При испытании шаговых двигателей применяются фрикционные моментомеры (рис. 2.6). Нагрузка на валу испытуемого двигателя

осуществляется нажатием колодок на шкив при изменении тока в обмотке возбуждения электромагнита. Механизм измерительного устройства состоит из магнитопровода, прикрепленного пластинками к поворотной перекладине, оси, тарировочного диска, стрелки.

Электродинамический тормоз (рис. 2.7). Испытуемый двигатель и балансировочная машина, в качестве которой часто используется генератор постоянного тока, жестко соединены между собой. Нагрузочный генератор имеет независимое возбуждение с широким

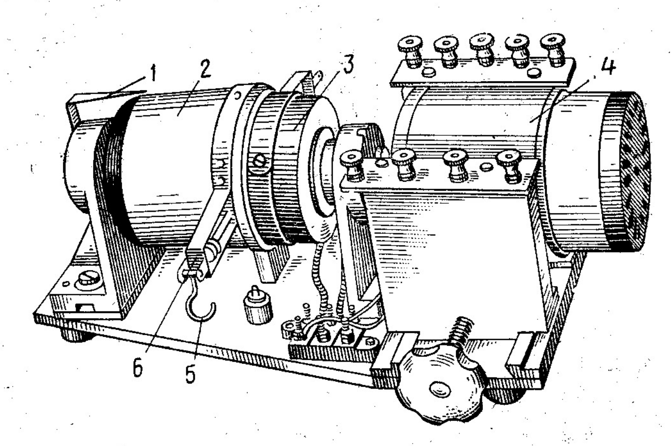


Рис. 2.7. Электродинамический тормоз:

1 — стрелка; *2* — станина; *3* — балансировочная машина; *4* — испытуемый двигатель; *5* — крючья; *6* — рычаг

пределом регулирования. Станину уравновешивают с помощью грузов, которые подвешивают на рычагах, имеющих крючки, так, чтобы рычаги находились в горизонтальном положении, стрелка — на нуле.

Вращающий момент определяется как $M_т = Ql$, где Q — сила тяжести груза; l — плечо его закрепления. Момент на валу испытуемого двигателя $M = M_т + \Delta M$, где $M_т$ — тормозящий момент, уравновешивающий станину; ΔM — момент, эквивалентный потерям тормоза, который определяется по тарировочным кривым и включает моменты трения испытуемого двигателя и нагрузочного генератора.

Электромагнитный тормоз. Широкое применение электромагнитных тормозов обусловлено простотой в изготовлении и удобством в эксплуатации. На рис. 2.8 приведено несколько разновидностей конструктивных схем электромагнитных тормозов, с помощью которых измеряют вращающие моменты машин различных типов.

На рис. 2.8, *а* представлен электромагнитный тормоз с цилиндрическим ротором индукционного типа. Неподвижный статор и ротор выполнены из малоуглеродистой стали. В средней части тормоза расположена обмотка возбуждения, питаемая постоянным током. Вращающийся ротор имеет прямоугольные зубцы. Все зубцы ротора, расположенные слева от обмотки возбуждения, имеют одну поляр-

ность (N), а расположенные справа — другую (S). Вращение ротора приводит к периодическому изменению магнитного потока, проходящего через различные участки статора, в результате на поверхности статора, обращенной к зубцам ротора, появляются вихревые токи. Так как в индукторных тормозах магнитный поток не изменя-

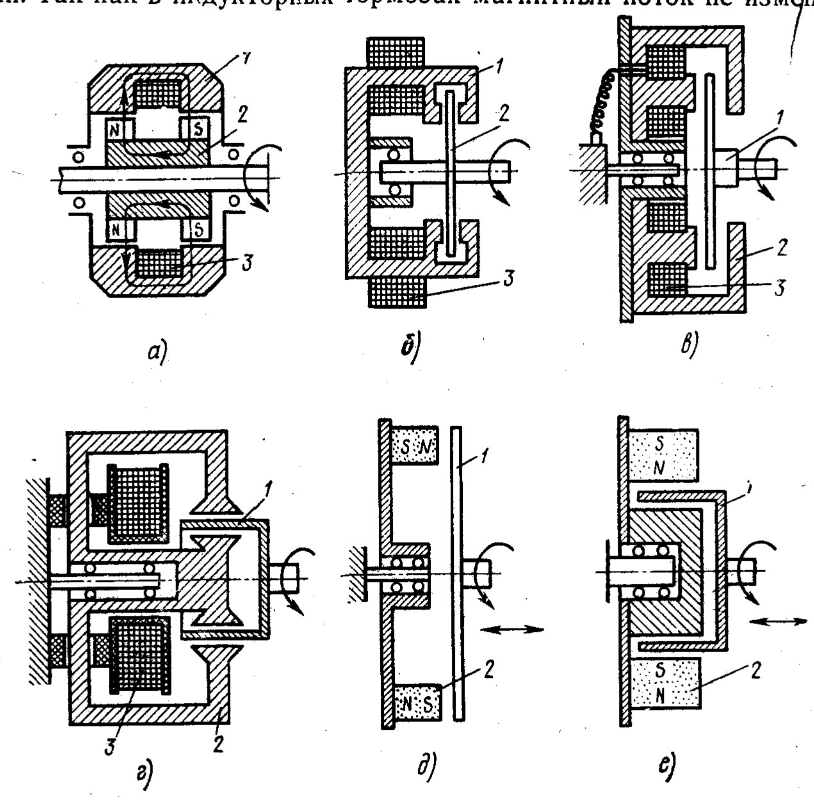


Рис. 2.8. Схемы электромагнитных тормозов:

а — индукторный; *б* — с дисковым ферромагнитным ротором; *в* — с немагнитным дисковым ротором; *г* — с цилиндрическим немагнитным ротором; *д, е* — с возбуждением от постоянных магнитов;
1 — статор; *2* — ротор; *3* — обмотка возбуждения

ется по направлению, то необходимо, чтобы разность потоков, проходящих через зубцы и пазы между ними, была достаточно большой.

На рис. 2.8, *б* представлена конструкция электромагнитного тормоза с дисковым ферромагнитным ротором и неподвижным статором. Магнитный поток, созданный обмоткой возбуждения, замыкается через ротор, полюсные наконечники и сердечник статора. При вращении ротора в неподвижном магнитном поле в нем возникают вихревые токи.

Основные недостатки электромагнитных тормозов (рис. 2.8, *а*, *б*) — большой момент инерции ротора, наличие сил магнит-

ного тяжения между статором и ротором. Последний недостаток устраняется, если применять электромагнитные тормоза с немагнитными роторами (рис. 2.8, *в*, *г*).

Иногда применяются магнитоэлектрические тормоза (рис. 2.8, *д*, *е*).

Удачная конструкция электромагнитного тормоза разработана на кафедре электрических машин МЭИ (рис. 2.9). Этот тормоз позволяет снимать неустойчивую часть кривой момента и имеет сравнительно широкие пределы измерений.

Тормоз имеет алюминиевый (медный) диск, который соединяется с валом испытуемого двигателя, а система элек-

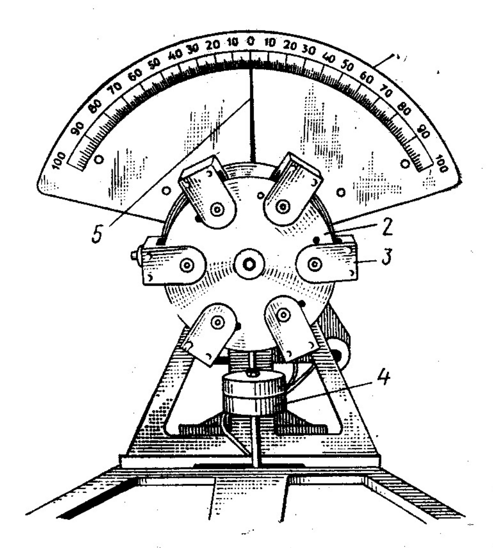


Рис. 2.9. Электромагнитные тормоза конструкции МЭИ:

1 — шкала; *2* — диск; *3* — система электромагнитов; *4* — груз; *5* — стрелка

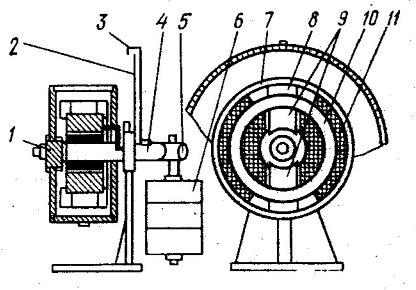


Рис. 2.10. Электромагнитный тормоз ТЭМ-ВС:

1 — ротор; *2* — шкала; *3* — стрелка; *4* — упорная втулка; *5* — полый вал; *6* — сменные грузы; *7* — кожух; *8* — прокладки; *9* — полюса; *10* — кольцевой магнитопровод; *11* — обмотка возбуждения

тромагнитов укреплена на кольце, которое может поворачиваться в направлении вращения диска. Момент испытуемой машины определяется с помощью стопорной шпильки, установленной между диском и магнитной системой.

В настоящее время разработано несколько серий электромагнитных тормозов. Так, серия ТЭМ включает в себя типы ТЭМ-400, ТЭМ-300, ТЭМ-200, ТЭМ-100; число в наименовании указывает на диаметр диска в миллиметрах.

Для испытаний высокоскоростных микродвигателей предназначены тормоза серии ТЭМ-ВС (ТЭМ-ВС-25, ТЭМ-ВС-50, ТЭМ-ВС-100, ТЭМ-ВС-200); цифра в обозначении серии указывает на номинальное значение частоты вращения (от 25 000 до 200 000 об/мин). В тормозах этой серии устранены такие недостатки, как влияние вентиляционных моментов от трения ротора прибора о воздух при вращении за счет улучшения обтекаемости рото-

ра, влияние нагревания ротора при большой мощности торможения, наличие высоких механических напряжений при высокой частоте вращения (рис. 2.10). Тормоз охлаждается водой через полый вал.

Измерение момента по ускорению в процессе разбега осуществляется путем электрического дифференцирования скоростной функции с помощью электромашинного измерителя ускорения — ЭМИ [10] (рис. 2.11).

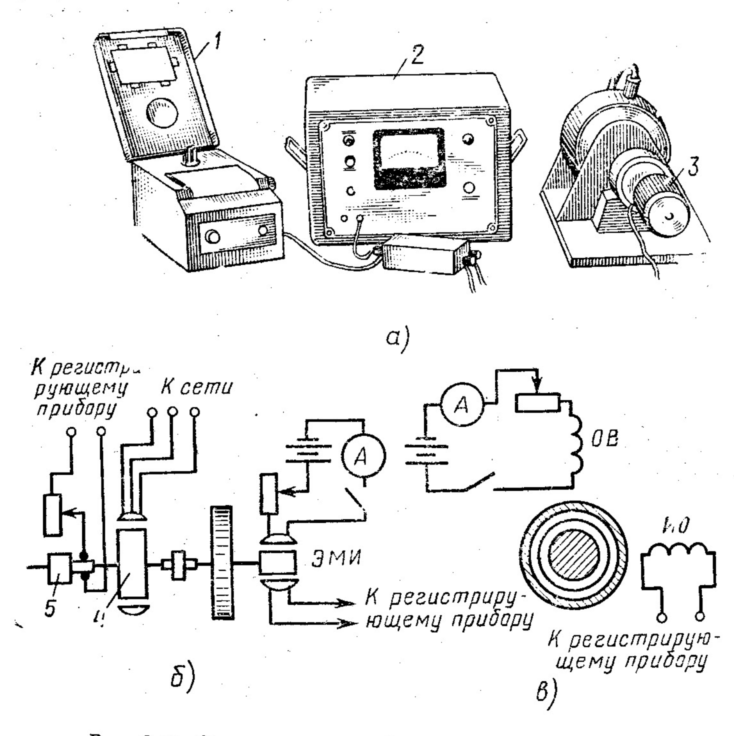


Рис. 2.11. Электромашинный измеритель ускорений:

а — элементы установки; *б* — принципиальная схема; *в* — схема тахогенератора; *1* — самописец; *2* — фотоэлектронный усилитель; *3* — измеритель ускорений; *4* — двигатель; *5* — тахогенератор

В качестве ЭМИ используется машина с полым ротором (ТГ — тахогенератор), в которой оси обмоток статора сдвинуты в пространстве на электрический угол 90°. Статор выполнен из двух частей (внешнего и внутреннего). Полый тонкостенный ротор выполнен из немагнитного материала (бронзы или меди). Обмотка ЭМИ (обмотка возбуждения *ОВ*) питается от источника постоянного тока. Измерительная обмотка *ИО* соединяется с регистрирующим прибором, в качестве которого используется инерционный шлейф с повышенной чувствительностью или самопишущий прибор с фотоэлектронным усилителем.

Токи, наведенные в роторе при вращении в магнитном поле, созданном обмоткой возбуждения, пропорциональны частоте вращения.

Эти токи создают поперечный поток Φ_q, который наводит в измерительной обмотке ЭДС, пропорциональную ускорению dn/dt:

$$e_2 = kd\Phi_q/dt = k_1 dn/dt.$$

При этом момент

$$M = GD^2 e_2/(38{,}2k_1),$$

где GD^2 и k_1 — постоянные, определенные расчетным или опытным путем.

На рис. 2.12 представлена зависимость $M=f(t)$ однофазного асинхронного двигателя с пусковым сопротивлением, записанная на самописце. Для увеличения времени разбега $t_{разб}$ испытуемого двигателя используется добавочная маховая масса $GD^2_{доб}$.

Чтобы получить зависимость $M=f(n)$, одновременно необходимо записывать частоту вращения $n=f(t)$ с помощью тахогенератора. Масштаб $M=f(t)$ может быть определен по начальному пусковому моменту, найденному с помощью какого-либо тормозного устройства.

Указанный метод записи кривой $M=f(n)$ пригоден для двигателей мощностью от 50 до 500 Вт.

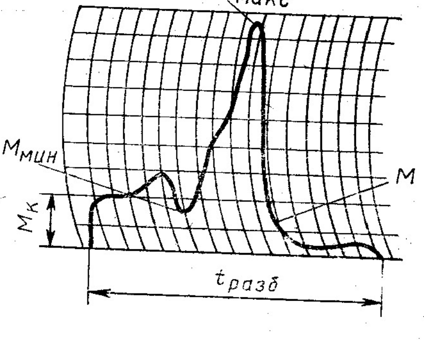


Рис. 2.12. Кривая $M=f(t)$ однофазного асинхронного двигателя с пусковым сопротивлением

Компенсационные измерители вращающего момента с автоматическим уравновешиванием. Для пояснения принципа действия моментомеров подобного типа рассмотрим конструкцию моментомера ММ-1А, который широко применяется при исследовании моментных характеристик коррекционных двигателей гироприборов, для измерения момента трения подшипников, пускового и аэродинамического моментов, а также для регистрации моментной характеристики гиромоторов обращенного исполнения (с внешним ротором) без кожуха.

Функциональная схема моментомера приведена на рис. 2.13. Внешний момент M_1 действует на подвижную систему *ПС*, которая поворачивается на некоторый угол α. В результате поворота датчика угла *ДУ*, ротор которого жестко сцеплен с осью *ПС*, возникает сигнал ΔU, пропорциональный углу α. Сигнал ΔU поступает на вход фазочувствительного усилителя *ФЧУ*, где выпрямляется детектором-демодулятором, усиливается и в виде тока I поступает на силовой элемент *СЭ*. Под действием момента M_2 от *СЭ* подвижная система поворачивается до тех пор, пока не скомпенсируется M_1, так как катушка *СЭ* жестко с ней связана. В установившемся режиме $M_1 = M_2 \pm M_3$, где M_3 — момент трения *ПС*. Без учета M_3 и в пре-

Рис. 2.13. Функциональная схема моментомера ММ-1А

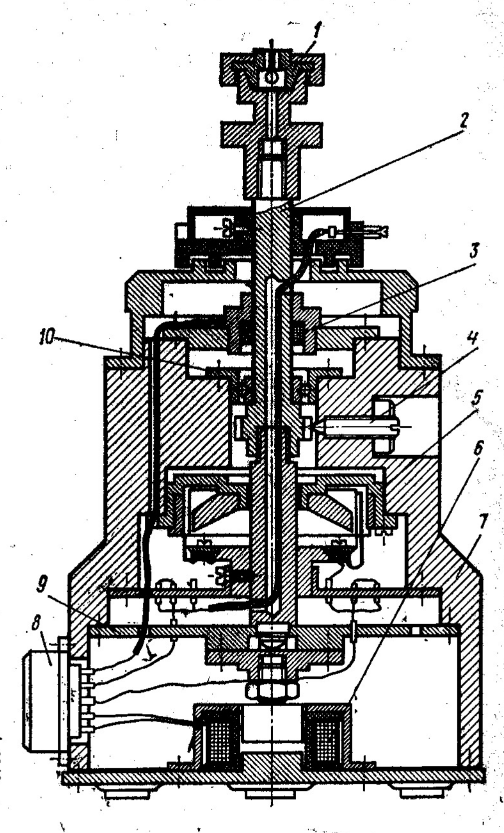


Рис. 2.14. Конструкция моментомера ММ-1А:

1 — цанговый зажим; *2* — подвижная система; *3* — датчик угла; *4* — стопорный винт; *5* — втулка; *6* — силовой элемент; *7* — корпус; *8* — разъем; *9* — мембрана; *10* — подшипник

делах линейности характеристики *СЭ* $M_2 = kI$, где k — коэффициент пропорциональности; I — ток в катушке *СЭ*.

По значению тока I с достаточной точностью можно судить о значении M_1. При измерении M_1 используют шунты $R_ш$. Для получения сигнала, пропорционального моменту, и его регистрации служат согласующие резисторы $R_с$ и согласующий усилитель *СУ*. Уменьшение трения в подшипниках подвеса *ПС* обеспечивается электромагнитным вибратором *ЭМВ*. Генератор опорного напряжения *ГОН* служит для питания *ДУ* и *ФЧУ*.

При измерении можно получить: а) в начале пуска — пусковой момент; б) в процессе разгона — сумму моментов динамического и аэродинамического: $M = M_{дин} + M_а$, где динамический момент $M_{дин} = J d\Omega/dt$, а аэродинамический момент $M_а$ трения наружной поверхности ротора о воздух измеряется в установившемся режиме. Момент трения подшипников измеряется в процессе выбега.

Конструктивно моментомер состоит из двух отдельных блоков: датчика и пульта управления, в который входят переключатель *Р*, блок питания *БП*, прибор для регистрации момента *М*. Испытуемый двигатель крепится с помощью цангового зажима (рис. 2.14). Моментомер ММ-1А позволяет измерять моменты от $1 \cdot 10^{-5}$ до $1 \cdot 10^{-3}$ Н·м. При этом погрешность измерений, зависящая от предела измерений и некоторых других факторов, характерных для моментомеров данного типа, соответствует требованиям, предъявляемым к измерительным устройствам при исследовании характеристик машин малой мощности.

В табл. 2.1 приведены технические данные некоторых моментомеров, которые могут быть применены при исследовании микромашин.

Таблица 2.1

Тип моментомера	Обозначение	Диапазон моментов, $\times 10^{-3}$ Н·м	Диапазон частоты вращения *, $\times 10^3$ об/мин	Размеры ротора $D \times L$, мм
Электромашинный	ЭМД-50	7—50	1,5—15,0	—
	ЭМД-200	30—200	1,5—15,0	—
	ТЭМ-1-50	7—50	1,0—10,0	—
	ТЭМ-2-150	50—150	1,0—10,0	—
	ТЭМ-2-500	150—500	1,0—10,0	—
Электромагнитный с ротором: а) из немагнитной стали	ТЭМ-ВС-25	До 21000	До 25	60×60
	ТЭМ-ВС-50	» 7000	» 50	45×45
	ТЭМ-ВС-100	» 1800	» 100	35×35
	ТЭМ-ВС-150	» 870	» 150	25×25
	ТЭМ-ВС-250	» 220	» 250	20×20
б) из дюралюминия, дисковый	МПД-3	30—200	1,0—12,0	120
	МЭМШ-3	180—1800	—	95
	МЭМШ-3М	1300—13000	3	145

Тип моментомера	Обозначение	Диапазон моментов, $\times 10^{-3}$ Н·м	Диапазон частоты вращения *, $\times 10^3$ об/мин	Размеры ротора $D \times L$, мм
в) из дюралюминия и меди, цилиндрический, полый	ТЕС-3-25	8—25	0,5—15,0	32×25
	ТЕС-3-50	15—50	1,0—15,0	32×25
	ТЕС-3-100	30—100	2,0—15,0	32×25
	ТЕС-4-50	15—50	0,3—15,0	42×25
	ТЕС-4-100	30—100	0,5—15,0	42×25
	ТЕС-4-200	70—200	1,0—15,0	42×25
	ТЕС-4-400	125—400	2,0—15,0	42×25
г) из дюралюминия, полый	ТЕС-5-500	150—500	1,5—10,0	72×50
	ТЕС-5-1000	300—1000	3,0—10,0	72×50
	ТЕС-6-2500	800—2500	1,5—10,0	102×50
	ТЕС-6-5000	1500—5000	3,0—10,0	102×50
д) из меди и алюминиевый, дисковый	МЭТ-1Д	3—20	35,0	30
	МЭТ-2Д	7—500	18,0	40
	МЭТ-3Д	15—1000	12,0	50
	МЭТ-4Д	30—2000	8,0	63
	МЭТ-5Д	70—5000	5,0	80
	МЭТ-6Д	150—10 000	4,0	100
	МЭТ-7Д	300—20 000	2,5	130
	МЭТ-8Д	700—25 000	2,0	160
	МЭТ-9Д	1500—50 000	1,5	200
	МЭТ-10Д	3000—100 000	1,2	250
е) из меди и алюминия, полый	МЭТ-1Ц	8—1 000	12,0	40×32
	МЭТ-2Ц	15—2 000	8,0	50×32
	МЭТ-3Ц	70—5 000	5,0	63×45
	МЭТ-4Ц	150—10 000	3,5	80×60
	МЭТ-5Ц	300—20 000	2,4	100×80
	МЭТ-6Ц	700—40 000	1,5	130×110
	МЭТ-7Ц	1500—100 000	1,0	170×150

* Предельная частота вращения дана для медных роторов.

§ 2.3. ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ

На рис. 2.15 приведена классификация методов измерения частоты вращения микромашин. Из многообразия тахометров рассмотрим наиболее распространенные, выпуск которых освоен промышленностью.

Строботахометр СТ-МЭИ. На рис. 2.16 приведены общий вид прибора и структурная схема, включающая в себя задающий генератор, источник питания, делитель частоты, усилитель мощности. Строботахометр — удобный переносной прибор, которым можно

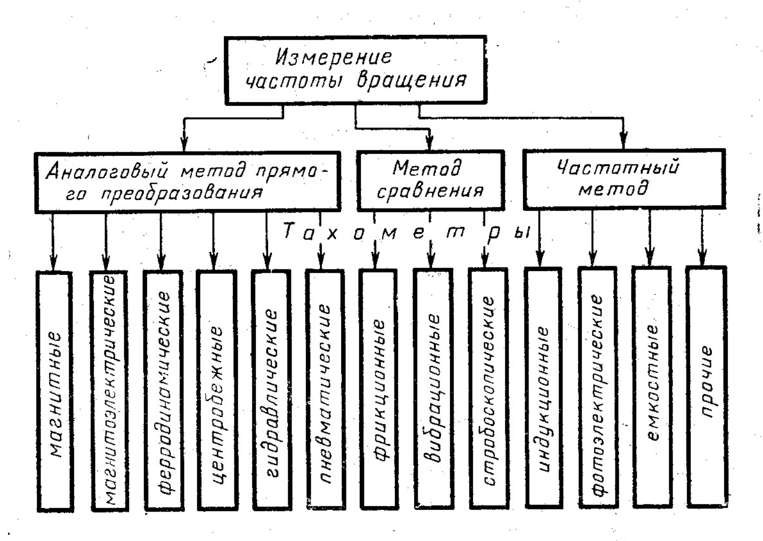


Рис. 2.15. Классификационная схема тахометров

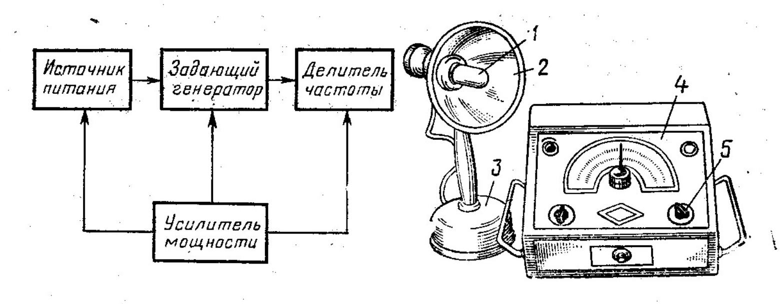


Рис. 2.16. Общий вид и структурная схема строботахометра СТ-МЭИ:

1 — импульсная лампа; *2* — рефлектор; *3* — корпус трансформатора; *4* — измеритель; *5* — переключатель

достаточно точно измерять частоту вращения, не нагружая испытуемый двигатель. С помощью строботахометра можно также измерять скольжение асинхронных машин, угол θ в синхронных машинах (при синхронизации с сетью), скорость механизмов, имеющих возвратно-поступательное движение, и частоту вибрации. Задающий генератор осуществляет плавное регулирование частоты импульсов. Он может работать как в генераторном, так и в усилительном режимах. При этом генераторный режим — основной при измерениях, усилительный — основной при синхронизации све-

товых импульсов с исследуемой частотой, задаваемой от внешнего генератора.

Импульсная лампа с рефлектором крепится на специальной стойке, внутри которой смонтированы импульсный трансформатор и устройство регулирования искрового промежутка. С помощью кабеля трансформатор подключается к измерителю. При измерении частоты вращения исследуемого двигателя частоту вспышек импульсной лампы изменяют до тех пор, пока вал не станет казаться остановившимся. Шкала импульсов в приборе отградуирована в оборотах в минуту и имеет следующие диапазоны: 300—1200, 1200—6000, 6000—30 000. Переход с одного диапазона на другой осуществляется переключателем. Точность измерения равна ±1%. Для измерения частоты вращения ниже 30 об/мин используют стробоскопические диски с различным числом секторов — 5, 7, 9, 11, 13 и т. д. При кажущейся остановке диска частота вращения вала равна отношению показания строботахометра к числу секторов. При измерении частоты вращения выше 30 000 об/мин получают два следующих друг за другом отсчета n_1 и n_2 по шкале стробоскопа, соответствующие неподвижному изображению предмета. Истинная частота $n = n_1 n_2 / (n_1 - n_2)$.

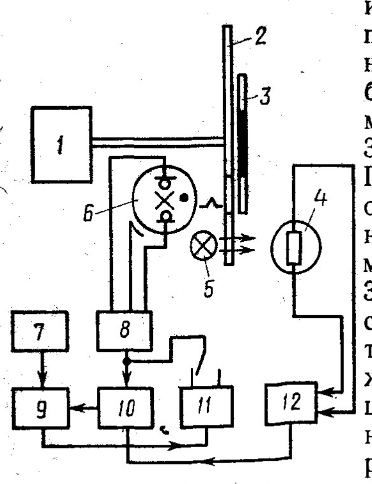


Рис. 2.17. Схема стробoтахометра с фотодатчиком:

1 — испытуемый двигатель; *2* — диск; *3* — прозрачная шкала; *4* — фотоприемник; *5* — лампа накаливания; *6* — импульсная лампа; *7* — кварцевый генератор; *8* — усилитель импульсов; *9* — отпирающий ключ; *10* — триггер; *11* — пересчетная схема; *12* — усилитель

Для некоторых измерений удобны стробoтахометры, у которых частота световых импульсов задается фотодатчиком в соответствии с измеряемой частотой вращения. На рис. 2.17 представлена схема такого прибора. На валу испытуемого двигателя закрепляется диск с прорезью. Перед диском укрепляются прозрачная шкала с затемненным центром и фотоприемник (фоторезистор или фотодиод), за диском установлены лампы накаливания и импульсная. Импульс напряжения, возникающий при прохождении прорези диска перед фотоприемником, усиливается усилителем и переводит управляющий триггер в состояние, отпирающее ключ. Частота кварцевого генератора усиливается и поступает на пересчетную схему. Командный импульс, усиливаясь усилителем импульсов, зажигает стробoтрон и через триггер возвращает схему в исходное состояние.

Вспышка импульсной лампы фиксирует смещение диска за время прохождения начальной точки шкалы от вспышки до вспышки. Наблюдатель видит светлую полосу на шкале (оптическая стрелка) и по ее положению отсчитывает показание прибора.

Строборама. На рис. 2.18 приведено механическое устройство, в котором установлен синхронный реактивный двигатель с диском на валу. В диске имеется прорезь, расположенная на уровне окуляра. Через прорезь ведется наблюдение за положением неподвижной точки, нанесенной на торце вала или диска вращающегося объекта. При равенстве частот вращения двигателя строборамы и испытуе-

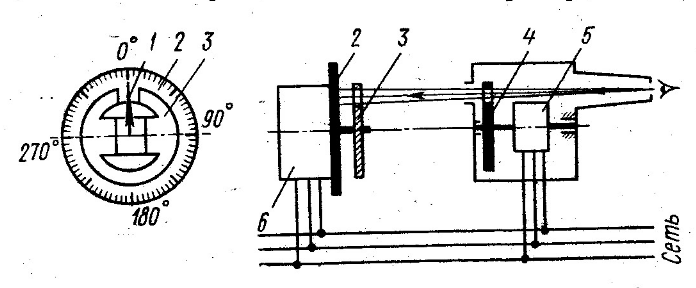


Рис. 2.18. Принципиальная схема строборамы:
1 — стрелка; *2* — шкала; *3, 4* — диски; *5* — синхронный двигатель; *6* — испытуемый двигатель

мого двигателя наблюдается одна неподвижная точка. В случае неравенства частот вращения двигателей, например, частота объекта вдвое меньше частоты вращения диска строборамы, глаз наблюдает две неподвижные точки. Установив на неподвижной части испытуемой машины шкалу, а на вращающейся части — изображение полюсов со стрелкой, можно снимать угловую характеристику синхронной машины при изменении нагрузки испытуемого двигателя.

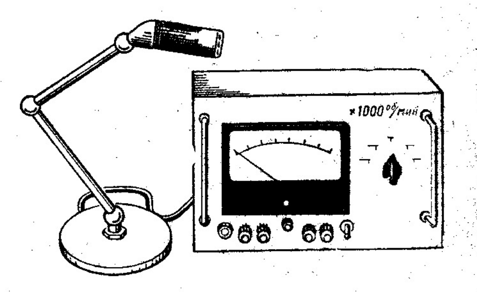


Рис. 2.19. Общий вид фототахометра ФТ-1

Фототахометр ФТ-1. Это автоматическое устройство, в котором отклонение стрелки в соответствии с измеряемой частотой вращения позволяет ускорить процесс измерения. На рис. 2.19 представлен общий вид тахометра ФТ-1, который имеет выносной фотодатчик.

Модуляторы светового потока могут иметь различные конструкции (рис. 2.20, *а—в*). Измерительный блок содержит источник питания, измерительный прибор и преобразователь частоты напряжения, необходимые для записи частоты вращения на осциллограмме.

Фототахометр ФТ-1 обеспечивает измерение частоты вращения с точностью 2,5% в диапазоне 500—18 000 об/мин, например при одной паре черно-белых секторов. Увеличивая число пар секторов на диске, можно измерять и более низкие частоты вращения.

Основные преимущества фототахометров — простота конструкции и возможность бесконтактного измерения частоты вращения

микромашин. Измерение средней частоты вращения в любом диапазоне с высокой точностью (до 0,001—0,00001%) можно выполнить, используя фотодатчик и цифровой частотомер.

Датчик частоты (рис. 2.21, а). Применение датчика частоты, включенного на электронный частотомер, позволяет создать устрой-

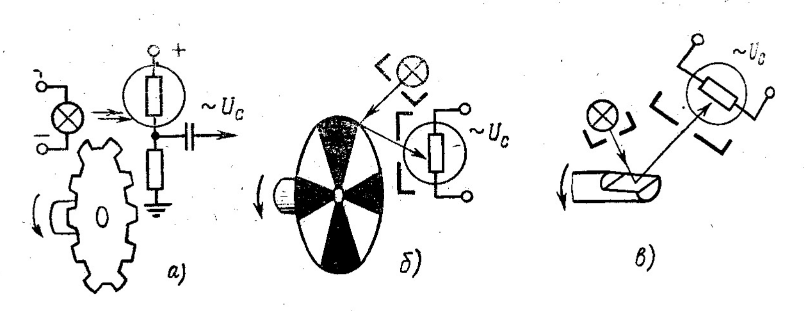


Рис. 2.20. Принципиальная схема модуляторов светового потока

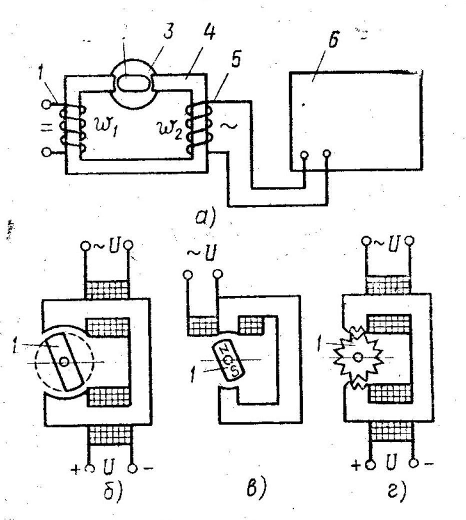


Рис. 2.21. Принципиальная схема и магнитные системы датчика частоты:

1 — первичная обмотка; *2* — ротор; *3* — испытуемый двигатель; *4* — магнитопровод; *5* — вторичная обмотка; *6* — измеритель частоты

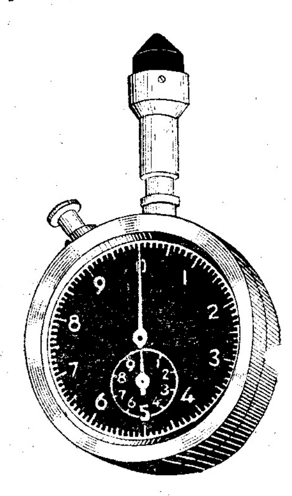


Рис. 2.22. Часовой тахометр

ство для измерения различных частот вращения. При этом чем меньше мощность выходного сигнала датчика, тем меньше тормозной момент, создаваемый датчиком.

Датчик состоит из ротора, закрепленного на валу испытуемого двигателя. Форма ротора должна быть явнополюсной (рис. 2.21, *б, в, г*). На магнитопроводе размещены обмотки (первичная и вторичная). Обмотка включена на измеритель частоты (ИЧ-5).

Выходной сигнал снимается с датчика в виде ЭДС, имеющей частоту, кратную частоте вращения испытуемого двигателя. При малых частотах вращения следует повысить частоту сигнала, для чего ротор изготовляют многополюсным (рис. 2.21, *г*). Если магнитная система ротора двухполюсная, то частота ЭДС $f=n/30$, где n — частота вращения испытуемого двигателя.

Часовой тахометр. При исследовании машин малой мощности в установившихся режимах широко используют часовые тахометры (рис. 2.22), которые не создают заметной дополнительной нагрузки на валу испытуемого двигателя и вместе с тем обеспечивают высокую точность измерения частоты вращения (доли процента).

Тахогенераторы. Частоту вращения испытуемых двигателей в рабочих и переходных режимах можно измерять с помощью тахометрических генераторов, в качестве которых могут использоваться асинхронные тахогенераторы с полым ротором и тахогенераторы постоянного тока (см. § 9.1 и 9.2).

Тахогенераторы жестко соединяются с испытуемыми двигателями и включаются на регистрирующие приборы (самописцы для записи $n=f(t)$, вольтметры, осциллографы и т. п.). Точность измерения частоты вращения определяется точностью регистрирующего прибора и тахогенератора. Технические данные некоторых тахометров приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Тип прибора и его назначение		Обозначение	Диапазон измерений частоты вращения, об/мин	Класс точности, %	Число диапазонов	Габариты прибора, мм
Центробежный для дистанционных измерений		ТЦ-45	400—3 000	2	1	⌀ 80×82
Центробежный стационарный		ТС-100 ТС-120 ТС-200	200—3 000 50—10 000 50—10 000	1 1 1	1 1 1	189×100×60 290×125×90 364×200×94
Индукционный малогабаритный с синхронным датчиком		ТЭ-1ТЭ-2 ТЭ-3ТЭ-4	250—2 600 300—4 000	1,5	1 1	—
Вибрационный стационарный		ТВ-1	900—1 200 10 000—15 000	2	1	⌀ 170
Электрический для стационарных установок	постоянного тока	К-16	150—1 000	1	10	291×215×150
	переменного тока	К-17 К-18	150—1 000 150—1 000	1 1	10 9	215×144×132 110×110×175

Тип прибора и его назначение	Обозначение	Диапазон измерений частоты вращения, об/мин	Класс точности, %	Число диапазонов	Габариты прибора, мм
Часовой ручной	94-П СК	50—1 000 0—10 000	1 1	2 1	59×105 113×89×25
Магнитный ручной для непосредственного измерения частоты вращения	ИО-30	30—30 000	2	3	∅ 70×133
	ТМ-1	0—1 000 0—3 000	3 3	1 1	∅ 90×150
Электрический с трансформатором насыщения	ТГ-029	0—25 000	1,5	8	—
Стробоскопический переносной бесконтактный	СТ-5	250—32 000	0,5	7	194×214×304
	СТ-4	300—30 000	1	5	288×382×200
	СТ	300—30 000	1	3	284×382×200
	ПСТ-1М	600—15 000	1,5	5	200×150×250
	ТСТ-1	450—30 000	0,03	44	—
Фотоэлектрический гетеродинный лабораторный	КТЛ-10 КПШ-2	110—11 000 1 000—22 500	0,03 0,05	40 40	— —
Электронный счетный с фотодатчиком	УСП-10 СРП-100	50—100 000 100—100 000	0,001 0,01	40 40	— —

Вопросы для самопроверки

1. Какие существуют методы определения вращающих моментов?
2. Перечислите основные элементы конструкций электромагнитных и магнитоэлектрических тормозов.
3. Какие существуют методы определения частоты вращения?

Глава 3

ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ ЗВУКА, ВИБРАЦИИ И РАДИОПОМЕХ

§ 3.1. ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ ЗВУКА

С физической точки зрения, *звук* — это механические колебания определенных частот, распространяющиеся в газообразной, жидкой или твердой среде. Основные характеристики таких колебаний — частота, амплитуда и фаза. Фазовая характеристика шу-

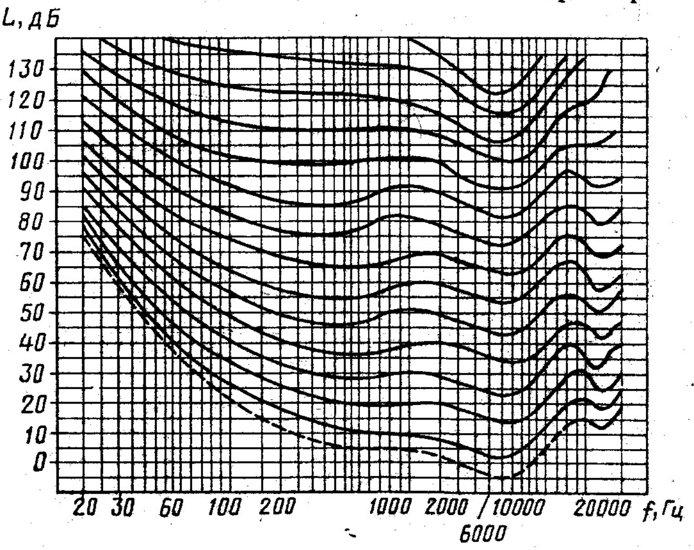


Рис. 3.1. Схема кривых равной громкости

ма обычно не принимается во внимание, так как шумовой сигнал состоит из частотных составляющих со случайной фазой.

Совокупность частотных составляющих шума называется *спектром*. Знание спектрального состава шума, т. е. зависимости амплитуды синусоидальной составляющей от частоты колебания, позволяет правильно выбрать средства борьбы с шумом [17].

Увеличение любой частоты вдвое приводит к ощущению повышения тона на октаву. Например, изменение частоты от 100 до 200 Гц или от 200 до 400 Гц воспринимается на слух как изменение звука на 1 окт. Диапазон доступных слуху звуков равен 10 окт. Частотный диапазон звуков, воспринимаемых нормальным человеческим ухом, колеблется от 16 до 16 000 Гц. Наибольшей чувствительностью человеческое ухо обладает в области частот от 800 до 7000 Гц.

На рис. 3.1 приведены кривые равной громкости, представляющие собой зависимости уровня звукового давления L от частоты f. Интенсивность звука, характеризующая порог слухового восприя-

тия во всем диапазоне частот, соответствует нижней кривой; интенсивность звука, вызывающая болевые ощущения, — верхней кривой.

Для анализа акустических характеристик различных объектов пользуются логарифмической величиной с единицей децибел (дБ), использование которой обусловлено тем, что интенсивность самого слабого звука, слышимого человеческим ухом, равна 10^{-12} Вт/м^2, а интенсивность звука, соответствующая пределу болевого ощущения, — 10^{13} Вт/м^2. За эталонную величину принимается интенсивность звука, равная 10^{-12} Вт/м^2. Однократное увеличение интенсивности звука в 10 раз соответствует 1 Б.

Причиной распространения звуковых волн является звуковое давление (Па)

$$P_{зв}=p+\Delta p, \tag{3.1}$$

где p — давление в невозмущенной среде; Δp — избыточное давление.

Распространение звуковых волн в любой среде сопровождается колебаниями частиц около положения равновесия с колебательной скоростью u. Колебательная скорость u во много раз меньше скорости распространения звука c. Колебательная скорость — характеристика определенного источника. Отношение звукового давления к колебательной скорости соответствует акустическому сопротивлению среды (Па·с/м^3)

$$\rho c=P_{зв}/u. \tag{3.2}$$

Звуковая волна — носитель энергии в направлении своего движения. Количество энергии, переносимой звуковой волной за 1 с через площадку в 1 м^2, перпендикулярную направлению движения, называется интенсивностью звука (Вт/м^2)

$$I=P_{зв}u=P_{зв}^2/(\rho c). \tag{3.3}$$

Уровень звукового давления определяется из соотношения

$$L=10\lg P_{зв}^2/P_0^2=20\lg P_{зв}/P_0, \tag{3.4}$$

где L — уровень звукового давления, дБ; $P_0=2\cdot10^{-5}$ Вт/м^2 — постоянная величина, соответствующая порогу слышимости; $P_{зв}$ — звуковое давление, Па.

Интенсивность звука (Вт/м^2), соответствующая порогу слышимости,

$$I_0=P_0^2/(\rho c). \tag{3.5}$$

В воздухе в нормальных условиях $\rho=1{,}2$ кг/м^3, $c=340$ м/с. Выражение (3.4) можно представить в виде

$$L=10\lg I/I_0, \tag{3.6}$$

где $I_0\approx10^{-12}$ Вт/м^2.

Интенсивность сложного звука можно представить как сумму интенсивностей отдельных составляющих:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n = \sum_{i=1}^{n} I_i, \qquad (3.7)$$

где I_1, I_2, ..., I_n — интенсивности отдельных гармонических составляющих звука или отдельных источников.

На основании (3.7) можно записать

$$P_{зв}^2 = \sum_{i=1}^{n} P_{зв\,i}, \qquad (3.8)$$

где $P_{зв\,i}$ — i-я составляющая звукового давления.

Согласно (3.3), выражение (3.8) можно привести к виду

$$P_{зв}^2 = P_0^2 \cdot 10^{0,1L_i}. \qquad (3.9)$$

После ряда несложных преобразований выражение (3.9) можно записать так:

$$L = 10 \lg \sum_{i=1}^{n} 10^{0,1L_i}, \qquad (3.10)$$

где L_i — уровень звука i-го источника.

Следовательно, если имеется n одинаковых источников, суммарный уровень звука

$$L = L_i + 10 \lg n. \qquad (3.11)$$

Например, если в помещении установлены четыре электродвигателя, шум каждого из которых составляет 60 дБ, то суммарный уровень шума (дБ)

$$L = L_i + 10 \lg n = 60 + 10 \lg 4 = 66. \qquad (3.12)$$

Уровень звука измеряется для исследования причин, вызывающих звук. Результаты акустических измерений в значительной степени зависят от методики измерения и аппаратуры, применяемой при этом. Совершенство методики измерений звука характеризуется измерительной аппаратурой, выбором точек измерений, способом установки машины и режимом ее работы.

За нормируемое значение уровня шума принимается среднее значение уровня звука L_{d1A} на расстоянии $d = 1$ м от контура машины при наличии звукоотражающего пола либо корректированное значение уровня звуковой мощности L_{pA} и соответствующие ему октавные уровни звуковой мощности L_p.

Согласно ГОСТ 23941—79, существует несколько методов получения шумовых характеристик: точные, технические и ориентировочные. Для каждого из указанных методов определены требования к условиям проведения измерений: в свободном или отраженном звуковом поле. Возможны измерения с помощью образцового источника.

Каждый из перечисленных методов имеет преимущества и недостатки. Измерение в свободном поле можно считать наиболее точным. Однако создание условий свободного звукового поля не всегда возможно, особенно если размеры исследуемой машины относительно велики. Для получения условий, близких к идеальному свободному полю, необходимо создавать специальные заглушенные безэховые камеры. Условия, адекватные свободному звуковому полю, могут быть получены закреплением источника (электрической машины) на звукопоглощающем полу и при отсутствии отражающих преград.

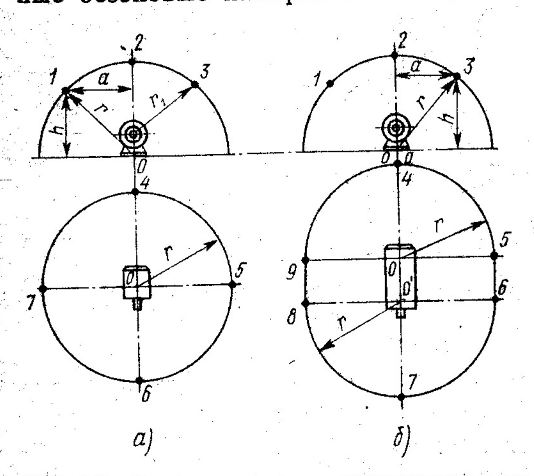


Рис. 3.2. Схема примерного расположения точек при измерении уровня звукового давления для двигателей нормального исполнения (*а*) и машин большой длины (*б*)

Уровень звукового давления измеряется в различных точках *1, 2, 3, ...* (рис. 3.2) вокруг машины, которые лежат на поверхности воображаемой полусферы (рис. 3.2, *а*) или цилиндра и полусферы (рис. 3.2, *б*).

При измерении уровня звука ориентировочным или техническим методом микрофон можно располагать на расстоянии, равном удвоенному линейному размеру машины.

В результате измерений в свободном звуковом поле по воображаемой полусфере вокруг машины можно определить звуковую мощность и интенсивность звука в каждой точке с последующим усреднением. Если усредняемые значения интенсивности звука, измеренные в n точках, отличаются друг от друга менее чем на 5 дБ, то за среднюю интенсивность принимается среднее арифметическое значение. Если они различаются более чем на 5 дБ, то усреднение проводится по формуле

$$L_{Ai} = 10\lg\left(\sum_{i=1}^{n} 10^{0,1L_{Ai}}\right) - 10\lg n, \qquad (3.13)$$

где L_{Ai} — интенсивность звука в i-й точке измерения на расстоянии 1 м от корпуса; n — число точек измерения.

На рис. 3.3 представлена структурная схема устройства для измерения и анализа интенсивности звука, в котором шумомер представляет собой аппарат для измерения уровня звукового давления в газовой среде, выраженного в децибелах. На рис. 3.4 представлена принципиальная схема шумомера. В табл. 3.1 приведены основные характеристики наиболее распространенных шумомеров.

Непосредственными измерениями можно получить следующие акустические характеристики ЭМ: уровень звука, общий уровень звукового давления, спектр уровней звукового давления.

Уровни звукового давления могут быть определены как непосредственным измерением с помощью октавных фильтров и спектрометров, так и пересчетом спектров, измеренных в полуоктавных или третьеоктавных диапазонах. Следует отметить, что октава соответствует частотному интервалу, в котором отношение граничных частот (верхней f_1 и нижней f_2) равно двум, т. е. $f_2/f_1=2$. Для третьеоктавной полосы $f_2/f_1=\sqrt[3]{2}=1{,}26$.

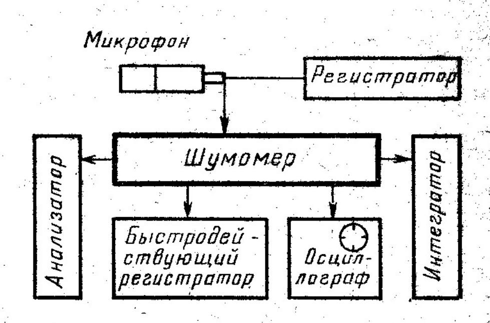


Рис. 3.3. Структурная схема устройства для измерения уровня звука

При изучении частотных характеристик шума, выявлении его источников, выработке рекомендаций по их ослаблению используются узкополосные анализаторы, как отечественные, например АС-3, С5-3, так и зарубежные, например типа 2105, 2107 фирмы «Брюль и Къер»; типа 1401 фирмы «Доу»; типа 2331 фирмы «Маркони» и др.

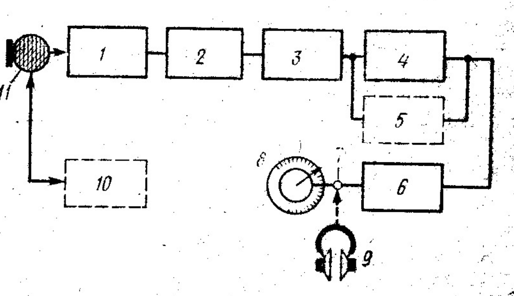


Рис. 3.4. Принципиальная схема шумомера:
1, 3 — аттенюатор; 2, 6 — усилитель; 4 — мостовая схема блока подстройки; 5 — подстройка полосовых фильтров; 7 — разъем; 8 — стрелочный прибор; 9 — наушники; 10 — устройство настройки; 11 — микрофон

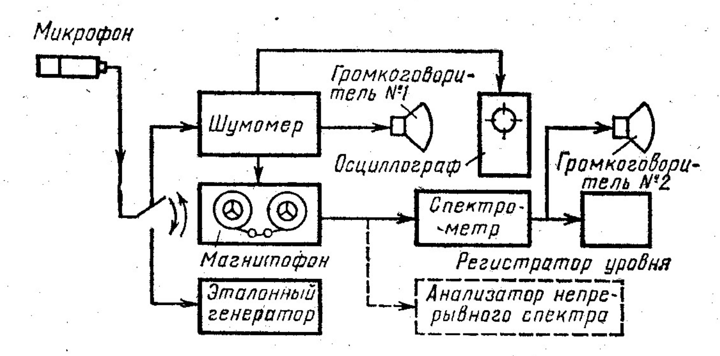


Рис. 3.5. Структурная схема устройства для регистрации и воспроизведения шума

Таблица 3.1

Тип шумомера	Тип и система микрофона	Диапазон частот, Гц	Диапазон измерения уровня шума, дБ	Примечание
Ш-63	МД-38Ш, электродинамический	$40—1\cdot10^4$	35—140	—
Ш3-М	МД-59, электродинамический	$40—1\cdot10^4$	25—130	—
СИ-1	М101, конденсаторный	$2—45\cdot10^3$	50—130	В комплект входят блоки фильтров, индикаторов предела уровней, катодный выпрямитель, низкочастотные приставки
ААШ-1	МД-59, электродинамический	$50—1\cdot10^4$	25—180	Комбинированный прибор для измерения уровней и спектрального состава шума
ИШВ-1	М101, конденсаторный	$3—20\cdot10^3$	30—130	—
2203	4131, конденсаторный	$20—18\cdot10^3$	22—134	Снабжен октавным фильтром 1613
2107, 2112, 2603, 2604	4131—4136, конденсаторный	$20—20\cdot10^3$	От 20 до 180	—
PS-101	ММ-50, конденсаторный	$20—20\cdot10^3$	30—135	Снабжен октавным фильтром OF-101
PS-201	ММ-50, конденсаторный	$20—20\cdot10^3$	30—135	
1400E	Кристаллический	$32—8\cdot10^3$	24—140	—
BM 292A	Конденсаторный	$32—8\cdot10^3$	44—130	—

Шумомеры и измерительные тракты должны удовлетворять требованиям стандартов СЭВ. Полосовые фильтры должны удовлетворять требованиям ГОСТ 23941—79.

Для регистрации и воспроизведения акустических характеристик используются самописцы, магнитофоны, запоминающие устройства и т. д. На рис. 3.5 представлена структурная схема устройства для регистрации и воспроизведения шума.

§ 3.2. ИЗМЕРЕНИЕ ВИБРАЦИЙ

Электрическая машина — сложная колебательная система. Силы, вызывающие эти колебания, по своей природе подразделяются на силы механического, магнитного и аэродинамического происхождения. На рис. 3.6 приведена классификационная схема основных причин и источников вибрации электрических микромашин.

Основными величинами при оценке вибрации электрических машин могут быть приняты (ГОСТ 20815—80): вибрационное смещение S — мгновенное значение отклонения колеблющегося элемента относительно положения равновесия, мкм; вибрационная скорость $v=dS/dt$ — мгновенное значение скорости колеблющего-

ся элемента, м/с; вибрационное ускорение $d^2S/dt^2=dv/dt$ — мгновенное ускорение колеблющегося элемента, м/с^2.

В случае гармонического колебания достаточно измерить частоту колебания и любую из основных величин. Так, для гармонической вибрации с частотой ω и амплитудой вибрационного смещения S амплитуды вибрационной скорости и ускорения равны

$$v=S\varepsilon;\ a=dv/dt=\omega^2 S.$$

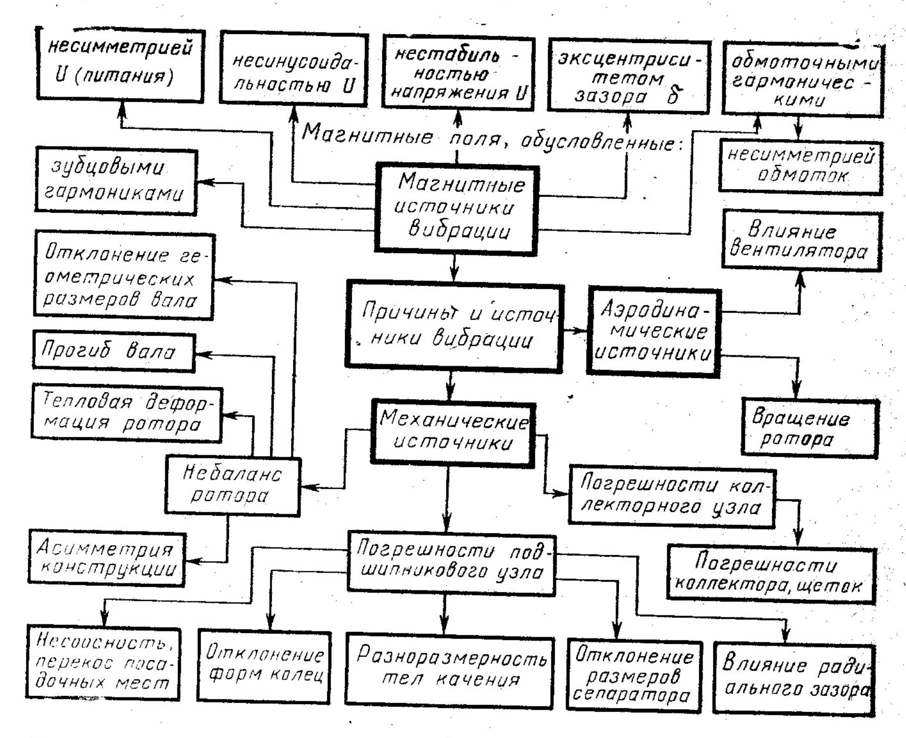


Рис. 3.6. Классификационная схема причин и источников вибрации электрических машин

Вибрации микромашин чаще всего представляются негармоническими. Для анализа их требуется запись спектра вибрации с последующим выделением частот и амплитуд составляющих. Так, о зазорах между вибрирующими деталями, их податливости и остаточной неуравновешенности можно судить по смещениям, возникающим при вибрации. Амплитуда смещений — критерий оценки вибрации только в том случае, если известна частота вибрации.

Вибрационная скорость v (м/с) — физический фактор, от которого зависит шум электрической машины, так как

$$L=20\lg(P_{зв}/P_0)=20\lg(v/v_0), \tag{3.14}$$

где $v_0=5\cdot10^{-8}$ м/с — опорное (условное нулевое) значение скорости воздуха.

Вибрационное ускорение характеризует силы, воздействующие на материалы конструкции и вызывающие усталость материала:

$$a_{дБ} = 20 \lg a/a_0, \tag{3.15}$$

где $a_0 = 3 \cdot 10^{-4}$ м/с² — условное нулевое значение вибрационного ускорения.

Таблицы перевода вибрационной скорости и вибрационного ускорения из абсолютных величин в децибелы приведены в приложении 2 к ГОСТ 20815—80.

Точность измерения вибрации микромашин зависит от измерительной аппаратуры, способа установки электрической машины, точек измерения и режима работы испытуемой машины.

Рассмотрим основные положения и требования, предъявляемые к измерительным приборам (ГОСТ 16826—71) в зависимости от вида измерений (типовых или контрольных).

Из множества имеющейся аппаратуры для измерения вибрации широко применяются электрические измерительные приборы, осуществляющие точный анализ вибрации в широком диапазоне частот. При этом они не влияют на корпус испытуемой машины и позволяют определять все три параметра (смещение, скорость и ускорение) вибрации. Вибрацию можно измерять, используя аппаратуру, предназначенную для акустических исследований, при этом заменив микрофон электродинамическим (индукционным) или пьезоэлектрическим датчиком (акселерометром). Они изготовляются из керамического пьезоэлектрического материала — титаната циркония или бария, который обладает сильным пьезоэлектрическим эффектом, заключающимся в появлении электрических зарядов на поверхности некоторых диэлектриков под действием механических усилий. В табл. 3.2 приведены основные характеристики акселерометров отечественного производства. Точность измерения при испытаниях зависит в основном от способа крепления датчика к испытуемой машине. Датчик должен жестко крепиться к машине или платформе, на которой машина установлена, с помощью резьбового соединения, клея или мастики. Поверхность, на которую устанавливается датчик, должна быть тщательно зачищена. На рис. 3.7 представлены некоторые виды акселерометров и способы их крепления. Масса его не должна превышать значения, составляющего десятую долю от массы машины. Электрический сигнал от акселерометра подается на усилительные и интегрирующие устройства. В качестве примера на рис. 3.8 представлена структурная схема устройства для измерения вибрации, в основу которой положены приборы фирмы «Брюль и Къер». На испытуемом двигателе закреплен акселерометр (4328 или 4329), который соединен экранированным кабелем (А00037) через зажим (Р0028) с предварительным усилителем (1606). Сигнал от предварительного усилителя передается на шумомер (№ 2111). К шумомеру с помощью экранированных кабелей (А00019 и А0002) и зажимов (Р0018 и Р4701) подключается регистратор (2305).

Таблица 3.2

Тип вибропреобразователя (акселерометра)	Основные технические характеристики пьезоэлектрических вибропреобразователей									Тип прибора, в комплект которого входит вибропреобразователь
	коэффициент преобразования по напряжению	частота собственных колебаний, кГц		диапазон измерения, Гц	емкость преобразователя с колебанием, пФ	наибольшее ускорение, м/с²	коэффициент поперечного преобразования	масса, г	габариты, мм	
		свободного	закрепленного							
ПДУ-1	0,12	—	20	$5—1\cdot10^4$	1100	3000	3—7	12	Ø 16	ПИУ-1М
ИС-313А	0,1	—	100	$50—4\cdot10^4$	1000	6000	7	12	—	Усилитель ИС 943 А
4336	0,4	125	125	$0—2,5\cdot10^4$	300	14000	8	2	—	—
ИС-579 А	0,6	100	—	$3—1\cdot10^4$	250	1000	5	9	Ø 5	—
КВ-10	0,1	10	—	$5—2\cdot10^3$	1000	1000	—	5	—	11003
1ПА-11	3,8	—	12	—	1700	—	4	18	22×20	—
КД-17	0,1	—	—	$5—1\cdot10^4$	1000	50000	—	10	5×162	11003
КВ-11	11,0	—	—	$0—2\cdot10^3$	2000	1000	—	15	5×162	11003
КД-91	0,5	50	—	$5—1\cdot10^4$	600	—	—	2	—	—
КД-35А	5,0	20	—	$5—4,5\cdot10^4$	1000	—	—	40	15×320	11003
Д23	0,1	15	—	$5—5\cdot10^4$	600	100	15	4	Ø 5	ВА-2
Д-13	8,5	16	—	$20—3\cdot10^3$	1000	1200	5—20	65	—	ВА-2
Д-14	2,5	30	—	$20—1\cdot10^4$	1000	1200	20	30	—	ВА-2

Для измерения вибрации применяются те же анализаторы, что и при измерении шума, т. е. октавные и третьеоктавные, узкополосные, с непрерывным спектром.

В табл. 3.3 приведены основные технические характеристики наиболее распространенных приборов для измерения вибрации. При вибрационных испытаниях в основном применяется упругая установка микромашин, в некоторых случаях — же-

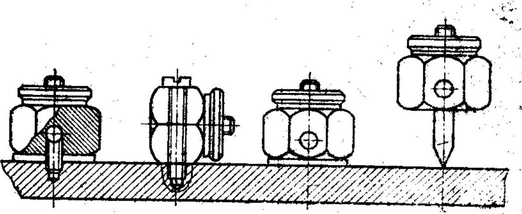


Рис. 3.7. Конструктивные схемы крепления акселерометров

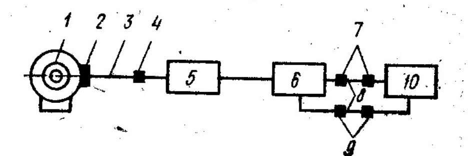


Рис. 3.8. Схема устройства для измерения вибрации:

1 — испытуемый двигатель; 2 — датчик; 3 — кабель; 4 — зажим; 5 — предусилитель; 6 — шумомер; 7, 9 — зажимы; 8 — кабель; 10 — регистратор

стская. Способ установки микромашин зависит от ее массы и способа монтажа в эксплуатации. Жесткий монтаж выполняется в том случае, если дополнительная масса (несущая рама или фундамент) не менее чем в 10 раз больше массы машины. Упругий монтаж выполняется путем подвешивания или установки микромашины на резиновом жгуте, пружине или на упругих опорах.

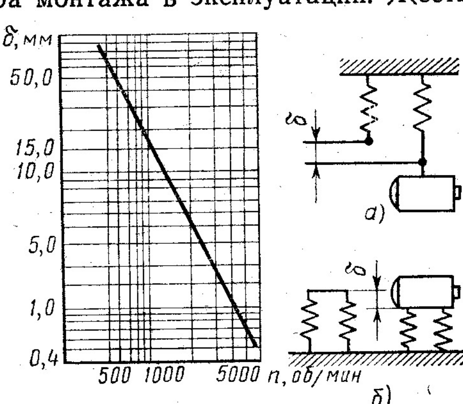


Рис. 3.9. Зависимость и схемы статической деформации упругой опоры:

а — двигатель подвешен упруго; *б* — двигатель на упругих опорах

На рис. 3.9 приведена зависимость статической деформации δ от частоты вращения *n* (об/мин). Вертикальная упругая установка считается правильно выполненной, если статическая деформация δ не превышает значения, приведен-

Таблица 3.3

Тип прибора	Основные технические характеристики приборов						
	частотный диапазон, Гц	диапазон измерений			тип вибропреобразователя	наименование измеряемого значения	погрешность измерения
		смещение, мкм	скорость, м/с	ускорение, м/с²			
Виброизмерительная аппаратура ВА-2	5—10000 (сД-14) 5—2000 (сД-23)	1—250 0,3—100	$1\cdot10^{-3}$—16 $3\cdot10^{-4}$—5	$3\cdot10^{-2}$—10^5 $0,3\cdot10^{-2}$—$3\cdot10^4$	Д-14 Д-13	Измеряет действующее значение	±12%
Виброизмеритель 11000	2—15000	3,2—$1\cdot10^{-5}$	0,32—3,20	$32\cdot10^{-3}$—320	КД-11 КД-12		±1 дБ
Измеритель вибрации 2501	100—2000 10—2000 10—500 10—2000	25—250 250—$25\cdot10^2$ $25\cdot10^2$—$25\cdot10^4$	$2,5\cdot10^4$ $2,5\cdot10^5$ $2,5\cdot10^{-5}$—2,5	1—1000	4336		±4%
Измеритель колебаний 11003	3—10 000	3—$1\cdot10^3$—$1\cdot10^4$	$3\cdot10^{-4}$—10	$3\cdot10^{-3}$—100	КД-12 КД-13 КД-11		±5%
Виброметр TS M-101	5—10 000	10—$1\cdot10^5$	$1\cdot10^{-3}$—10	0,01—1000	КД-11 КД-12		—

ного на рис. 3.9, для минимальной рабочей частоты вращения микромашины.

При испытании микромашин на упругом или жестком основании (креплении) датчик устанавливается на корпусе вблизи подшипниковых щитов по осям X, Y, Z или на подшипниковых щитах по осям X, Y, Z возможно ближе к оси вращения.

§ 3.3. ИЗМЕРЕНИЕ РАДИОПОМЕХ

Измерение напряжения радиопомех на зажимах источников должно проводиться в соответствии с ГОСТ 16842—72 и общесоюзными нормами допустимых индустриальных радиопомех с помощью измерителя радиопомех, отвечающих требованиям ГОСТ 11001—80. Измерения проводятся в частотном интервале 0,15—30 МГц. Шкала измерителя радиопомех градуируется в децибелах (дБ) относительно 1 мкВ:

$$1\ \text{дБ} = 20 \lg (U_1/U_2),$$

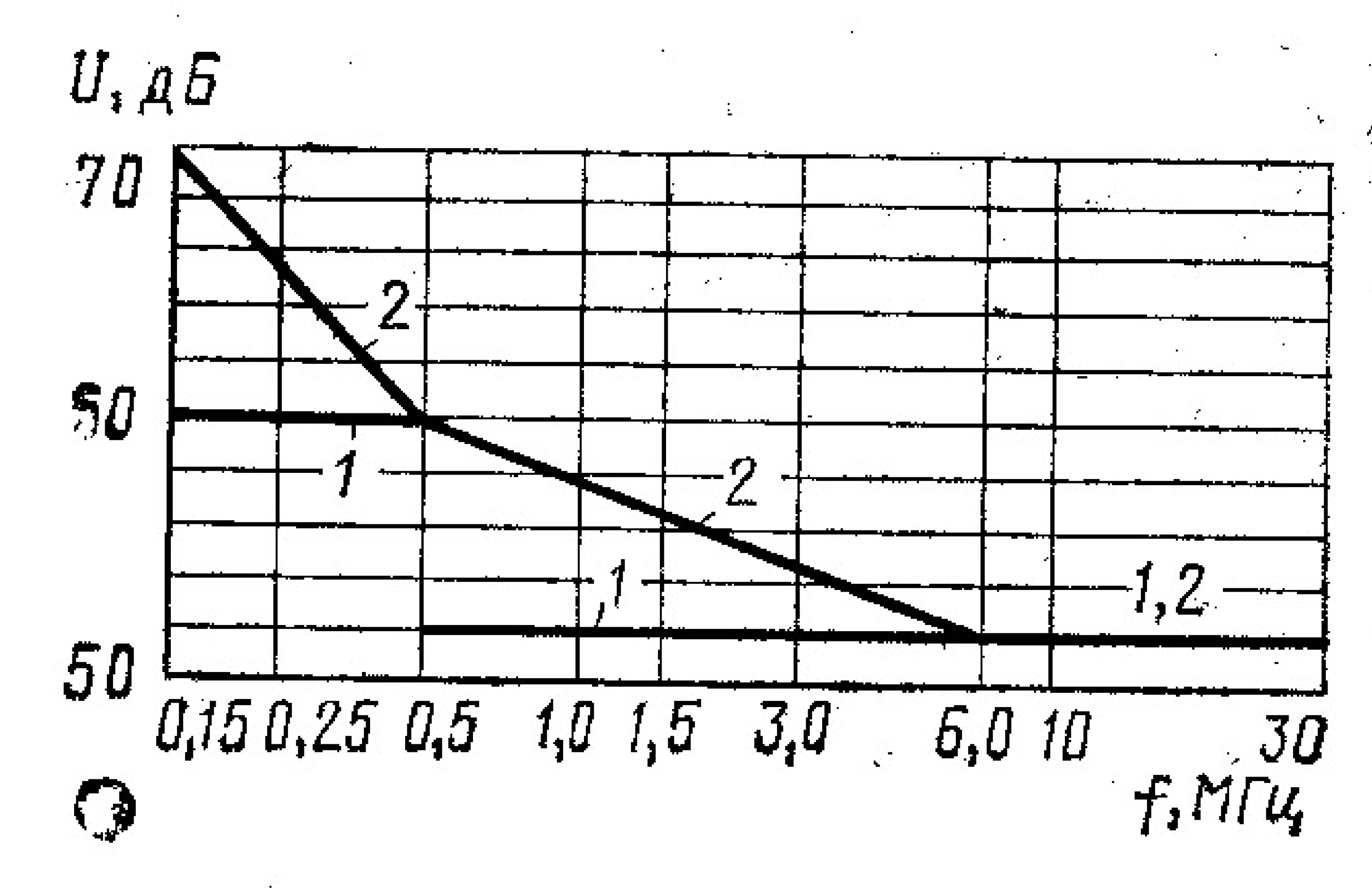


Рис. 3.10. Зависимость напряжения радиопомех

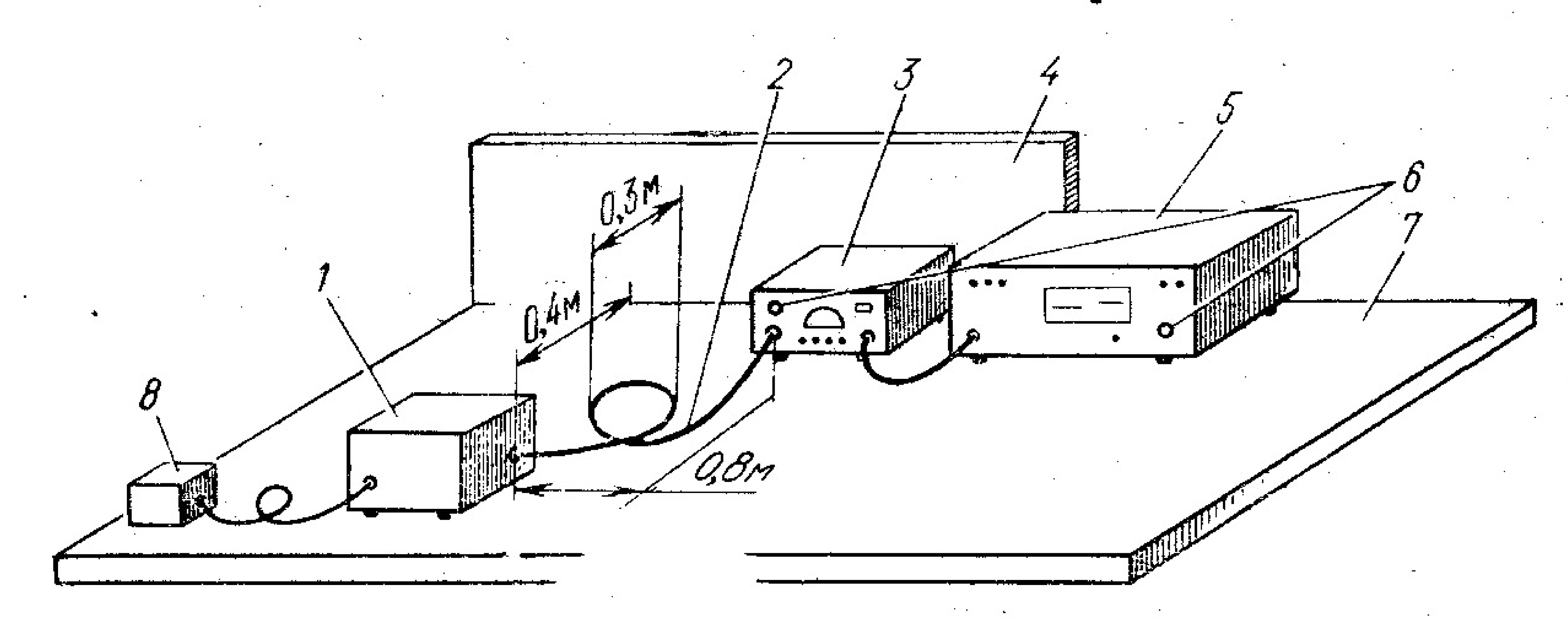


Рис. 3.11. Схема расположения приборов и оборудования при измерении напряжения радиопомех от малогабаритных электроустройств:

1 — испытуемое устройство; 2 — соединительный шнур; 3 — эквивалент сети; 4 — металлический лист; 5 — измеритель радиопомех; 6 — клеммы заземления; 7 — стол; 8 — выносной пульт управления испытуемым устройством

где U_1 — напряжение помех, мкВ, измеренное на какой-либо частоте из указанного интервала; $U_2 = 1$ мкВ — базовая величина.

Напряжение радиопомех от микромашин, используемых в бытовых электроустановках, в указанном интервале частот регламентируется общесоюзными нормами, которые могут быть представлены в виде зависимости (рис. 3.10).

На рис. 3.11 и 3.12 показано примерное расположение испытуемого микродвигателя и измерительных приборов на испытательном стенде. В качестве стенда для измерений радиопомех можно

использовать стол, выполненный из изоляционного материала и металлического листа размером не менее 2×2 м, который расположен перпендикулярно столу, при этом стол заземляется. Электродвигатель размещается на расстоянии 0,4 м от вертикально расположенного металлического листа. Используемый в данных схе-

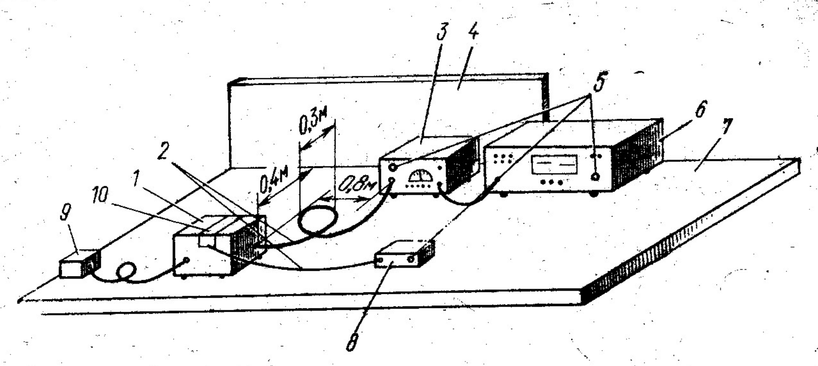


Рис. 3.12. Схема расположения измерительной аппаратуры при измерении радиопомех от устройств, которые при эксплуатации находятся в руках:

1 — испытуемое устройство; *2* — соединительный шнур; *3* — эквивалент сети; *4* — металлический лист; *5* — клеммы заземления; *6* — измеритель радиопомех; *7* — стол; *8* — эквивалент руки; *9* — пульт управления; *10* — металлическая фольга

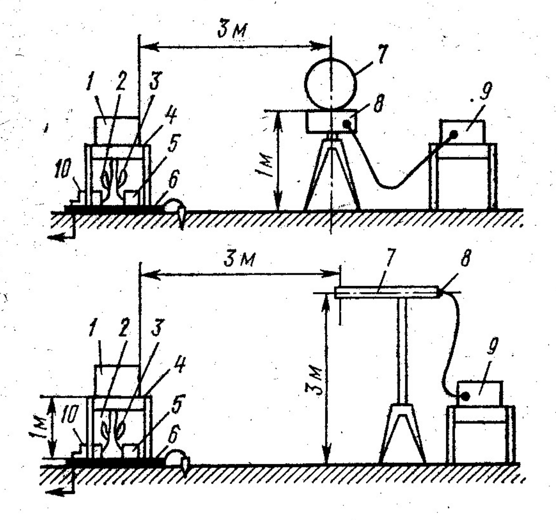


Рис. 3.13. Схема расположения приборов и оборудования при измерении напряженности поля радиопомех от малогабаритных устройств:

1 — испытуемое устройство; *2* — соединительный шнур; *3* — выходной шнур; *4* — поворотная подставка; *5* — нагрузка; *6* — металлический лист; *7* — антенна; *8* — антенная приставка; *9* — измеритель радиопомех; *10* — эквивалент сети

мах эквивалент сети соединяется с заземленным металлическим листом проводом или шиной длиной не более 0,3 м. Любые предметы и поверхности из токопроводящих материалов нельзя располагать ближе 0,8 м от электродвигателя.

Напряжение радиопомех допускается измерять в экранированных помещениях (камерах). При этом одна из стен камеры используется как вертикальный заземленный металлический лист.

Кроме напряжения радиопомех измеряется также и поле радиопомех, которое создается электродвигателем и подходящими к нему проводами питания. В интервале частот

0,15—30 МГц измеряется магнитная составляющая напряженности поля радиопомех, а в интервале частот 30—300 МГц — электрическая составляющая напряженности поля радиопомех.

Примерное расположение испытуемого электродвигателя, измерительной аппаратуры и вспомогательных приспособлений при измерении напряженности поля радиопомех показано на рис. 3.13 для двух типов антенн.

Измерительная антенна устанавливается против центра источника радиопомех на расстоянии 3 м от корпуса источника. Микромашину размещают на поворотной подставке, располагаемой на металлическом листе. На листе устанавливают эквивалент сети — выносной блок питания. Провода, соединяющие источник радиопомех с эквивалентом сети или выносным блоком питания, должны размещаться по оси поворота подставки. При измерениях подставку, на которой расположен источник радиопомех, поворачивают до получения максимальных показаний.

Условия работы электродвигателей или устройств, содержащих эти двигатели, необходимо соблюдать при измерении как напряжений, так и напряженности поля радиопомех (см. приложение 1 к нормам 1—72 и ГОСТ 16842—76).

Для измерения магнитной составляющей поля радиопомех используется антенна рамочного типа, а для измерения электрической составляющей напряженности поля радиопомех — антенна-диполь. Измерительный комплект для измерения составляющих напряженности поля радиопомех состоит из антенны и селективного микровольтметра, имеющего интервалы измерения частот 0,15—30 МГц и 30—300 МГц.

Вопросы для самопроверки

1. Что называется спектром шума?
2. Как определяется акустическое сопротивление среды?
3. Какие величины принимаются за основные при оценке вибрации электрических машин?
4. От чего зависит точность измерения вибрации электрических машин?
5. Какие способы крепления электрических машин применяются при исследовании вибрации и шума?
6. Какие величины используются для оценки радиопомех?
7. Как должна размещаться электрическая машина на стенде при измерении радиопомех?

Глава 4

АВТОМАТИЗАЦИЯ ИСПЫТАНИЙ МИКРОМАШИН

Массовый выпуск микромашин, особенно двигателей общего назначения, ставит весьма важную задачу автоматизации типовых испытаний в условиях их производства, а также при лабораторных испытаниях в НИИ. Автоматизация испытаний позволяет расширить программу испытаний, повысить их точность, сократить

время на их выполнение, исключить влияние субъективных факторов и резко снизить объем работы по оформлению результатов испытания. Она требует разработки специальных стендов и аппаратуры к ним, включающей блоки питания и управления, а также информационно-измерительный блок. При этом должно быть предусмотрено определение электрических и неэлектрических величин, в частности напряжений, токов и мощностей в различных режимах работы электрической машины, частоты вращения и вращающих моментов. Например, для асинхронных двигателей вращающий момент должен измеряться при пуске (начальный пусковой), в процессе разбега (минимальный, максимальный) и в рабочем режиме.

Стенды для автоматизированных испытаний должны обеспечить непрерывное наблюдение и регистрацию всех параметров, необходимых для определения характеристик машины в цифровой форме. Время записи характеристик не должно быть большим и желательно, чтобы оно не превышало нескольких минут. Точность измерения электрических и механических величин должна соответствовать требованиям ГОСТ 183—74, 16264—78.

Стенд для автоматизированных испытаний должен состоять из устройства для закрепления испытуемой машины; устройства для закрепления нагрузочной машины (если она используется) и ее центровки с испытуемой машиной; датчиков момента и частоты вращения; нагрузочной машины (или другого нагрузочного устройства); устройства для измерения положения ротора при определении зависимости пускового момента от углового положения ротора (например, редуктора с редукцией 1000/1).

Для измерения вращающих моментов могут быть использованы различные методы, описанные в гл. 2. Датчики момента и частоты вращения должны иметь выходные величины в виде электрических сигналов. Например, в качестве датчиков частоты вращения могут быть применены частотные датчики, выдающие 6 и 60 импульсов за один оборот вала машины, а в качестве датчика момента — датчик тензометрического типа, электромашинный датчик ускорения и др.

Нагрузочные машины выбираются в зависимости от типа испытуемой машины, частоты ее вращения и вида испытания. Для испытания машин с частотой вращения $n \leqslant 1000$ об/мин, снятия неустойчивой части механической характеристики асинхронных двигателей, испытания генераторов и опытного определения отдельных потерь могут использоваться нагрузочные машины постоянного тока, а для испытания двигателей с частотой вращения $n > 1000$ об/мин и снятия рабочего участка их механической характеристики — индукционные тормоза.

При закреплении нагрузочной машины и центровки ее с испытуемой машиной важно иметь возможность с достаточной точностью устранять несоосность валов сочленяемых машин в горизонтальной и вертикальной плоскостях, а также их перекос в горизонтальной плоскости без дополнительного регулирования. Соч-

лсняющие муфты должны обеспечить отсутствие чрезмерных вибраций.

Сложные технические требования предъявляются к информационно-измерительному блоку. На его вход подаются входные и выходные величины испытуемой машины в виде электрических сигналов. На выходе этого блока должны получаться аналоговые и цифровые сигналы, пропорциональные исследуемым параметрам.

Форма цифровых сигналов должна быть такой, чтобы были возможны их ввод в память ЭВМ и регистрация с помощью цифропечатающих устройств и графопостроителей.

В информационно-измерительный блок должны входить источник сигнала — отметчик времени для аналоговых регистраторов, встроенные показывающие приборы (класс точности не ниже 0,5) для измерения выходных сигналов. Желательно, чтобы аналоговый регистратор мог записывать функции как времени, так и одной из выходных величин. Питание, управление и контроль параметров нагрузочной машины, датчика частоты вращения, виброопор и других устройств в процессе испытания, а также коммутация силовых и измерительных цепей по определенной программе должны производиться в специальном блоке питания и управления. Так, для питания якоря нагрузочной машины постоянного тока можно использовать электромашинный усилитель (ЭМУ) поперечного тока. В этом блоке предусматривается аппаратура для включения под напряжение испытуемой машины, ЭМУ и нагрузочной машины (если они используются).

Программное устройство, входящее в блок питания и управления, должно обеспечить автоматическое выполнение испытаний в определенной последовательности для различных программ, например определения рабочих характеристик, характеристик холостого хода, параметров короткого замыкания и др. Во всех программах предусматривается измерение сопротивлений на постоянном токе.

В качестве примера рассмотрим структурную схему автоматизированной системы испытания асинхронных двигателей (рис. 4.1). В этой схеме в блок питания и управления входят:

Источник питания, в котором для регулирования напряжения, подаваемого на испытуемый двигатель, используется трансформатор с плавной регулировкой напряжения под нагрузкой. Источник питания управляется в соответствии со специальной программой, вводимой в управляющую вычислительную машину. Программа записывается на магнитной ленте или вводится с телетайпа.

Блок управления испытуемым двигателем содержит тиристорный электропривод, позволяющий включать и выключать двигатель, регулировать его нагрузку. Он связан как с испытуемым двигателем, так и с вычислительной машиной.

Наиболее важные функции выполняет информационно-измерительный блок, который осуществляет измерение тока и мощности потребления в режимах холостого хода, нагрузки и пусковом; вра-

ающих моментов на валу в рабочем режиме, максимального, ми-
имального, начального пускового; частоты вращения и ускоре-
ия.

Информационно-измерительный блок включает себя измеритель электрических величин; преобразователь «угол — од»; измеритель неэлектрических величин; управляющую вычислительную машину; устройство ввода — вывода, содержащее графопостроитель.

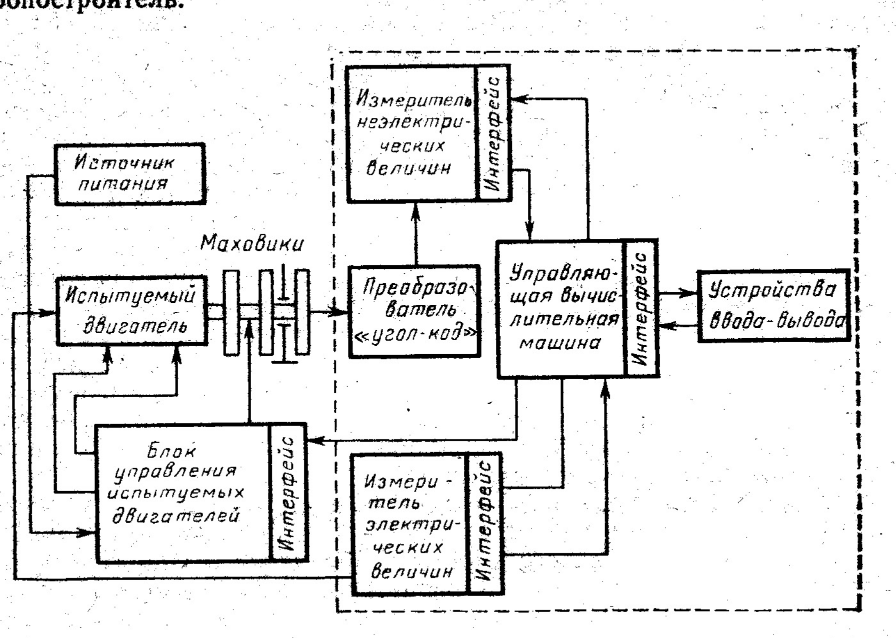


Рис. 4.1. Структурная схема автоматизированной системы для испытания асинхронных микродвигателей

Измерители электрических и неэлектрических величин через пециальные периферийные устройства — интерфейсы — связаны управляющей вычислительной машиной (УВМ).

Измеритель электрических величин выдает в управляющую вычислительную машину мгновенные значения измеряемых величин ерез равные промежутки времени с большой частотой. В УВМ эти анные обрабатываются и выдаются с помощью различных устройств вывода в цифровом виде или графически (с использованием графопостроителя или дисплея). При построении кривых используются действующие значения, найденные за определенные отрезки времени, более длительные, чем принято при выводе мгновенных значений на печатающем устройстве. В блоке измерения лектрических величин имеется индикаторная панель для визуального контроля за действующими значениями измеряемых величин. Перед режимом измерения этот блок калибруется — настраивается, для чего на входе имеются калибровочные заранее известные

значения напряжения и тока, проверяемые затем на приборах хода.

Преобразователь «угол—код» включает преобразователь «частота—код», выдающий числовой код, пропорциональный частоте вращения, и преобразователь «угол—код», выдающий сигналы в измеритель неэлектрических величин. В обоих преобразователях используются фотодиоды.

Измеритель неэлектрических величин суммирует и обрабатывает сигналы, поступающие из преобразователя «угол—код», и выдает для ввода в управляющую вычислительную машину угловую скорость Ω электрической машины и ускорение $d\Omega/dt$. Эти измерения производятся в процессе разбега двигателя, соединенного с маховиком для замедления процесса разгона, через малые интервалы времени.

Управляющая вычислительная машина управляет всем процессом испытания асинхронного двигателя и производит обработку результатов. По введенным данным электрических и неэлектрических величин вычисляют коэффициенты полезного действия η и мощности $\cos\varphi$, определяют скольжение для различных режимов работы. С помощью описанной автоматизированной системы испытаний, предназначенной для типовых испытаний асинхронных микродвигателей при их производстве, снимаются характеристики холостого хода и короткого замыкания, нагрузочный режим, разбег двигателя и находятся все показатели, регламентируемые ГОСТами. Время испытания одного двигателя 5 мин. Автоматизация испытаний с использованием вычислительной техники и вспомогательных технических устройств для вывода результатов испытаний находится на стадии развития и совершенствования. Она позволит повысить качество электрических микромашин — машин массового выпуска — за счет как увеличения числа испытываемых машин, так и увеличения глубины и точности испытаний.

Вопросы для самопроверки

1. Укажите преимущества автоматизированной системы испытаний машин малой мощности.
2. Перечислите требования, предъявляемые к стенду для автоматизированных испытаний.
3. Из каких устройств и элементов состоит стенд для автоматизированных испытаний?
4. Поясните назначение управляющей вычислительной машины при проведении автоматизированных испытаний.
5. Дайте обоснование содержания программы автоматизированных испытаний для неуправляемых микродвигателей.
6. Назовите методы измерения механических величин, используемые в автоматизированной системе испытаний.
7. Какие устройства применяются для регистрации результатов испытаний?

Раздел второй

ИСПЫТАНИЕ МИКРОДВИГАТЕЛЕЙ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ

Глава 5

ИСПЫТАНИЕ АСИНХРОННЫХ МИКРОДВИГАТЕЛЕЙ

§ 5.1. УНИВЕРСАЛЬНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Асинхронные двигатели малой мощности с короткозамкнутыми роторами широко применяются в качестве двигателей общего назначения: для привода станков, центрифуг, насосов, конторских машин, звукозаписывающих аппаратов, машин для стрижки овец и дойки коров, холодильных, посудомоечных и стиральных машин, киноаппаратуры, вентиляторов, медицинского оборудования и др., а также в качестве вспомогательных — силовые двигатели в автоматических устройствах. Классификация асинхронных двигателей и их условные обозначения приведены в ГОСТ 23264—78.

Асинхронный трехфазный двигатель с короткозамкнутым ротором можно использовать без каких-либо изменений его конструкции и обмоточных данных как однофазный двигатель с *пусковым сопротивлением* или *пусковой емкостью* и как *конденсаторный* с рабочей емкостью, а также с рабочей и пусковой емкостью. Можно спроектировать асинхронный двигатель, который будет работать как трех- и однофазный. Такой двигатель называется *асинхронным универсальным.* Его универсальность целесообразна в том случае, если параметры схемы замещения машины и добавочные фазосмещающие элементы выбраны так, что получаются достаточно хорошие рабочие и пусковые характеристики. В СССР выпускаются универсальные асинхронные микродвигатели серии УАД и ДА. Разработаны однофазные модификации асинхронных двигателей серии 4АА с высотами осей вращения 50—71 мм.

Трехфазный двигатель (рис. 5.1, *а, б*) и полученные из него однофазные двигатели с пусковыми элементами показаны на рис. 5.1, *в, г, д*. В качестве пускового элемента в двигателях малой мощности используется активное сопротивление $R_п$, которое обычно включается в пусковую обмотку (провод берется малого сечения или часть обмотки выполняется в виде бифиляра), или пусковая емкость. В универсальных асинхронных двигателях чаще всего применяются соединения обмоток статора в симметричную звезду (рис. 5.1, *в*) или треугольник (рис. 5.1, *г*). Иногда применяется последовательно-параллельное соединение обмоток статора (рис. 5.1, *д*). При этом рабочая (главная) фаза получается последова-

тельным соединением двух фаз трехфазного двигателя и питается от однофазной сети непосредственно, третья (вспомогательная) фаза присоединяется к той же сети через пусковой элемент $R_п$ или $C_п$. В качестве выключателя используется специальное реле, которое отключает пусковую фазу после достижения частоты вращения 0,75—0,80 от синхронной.

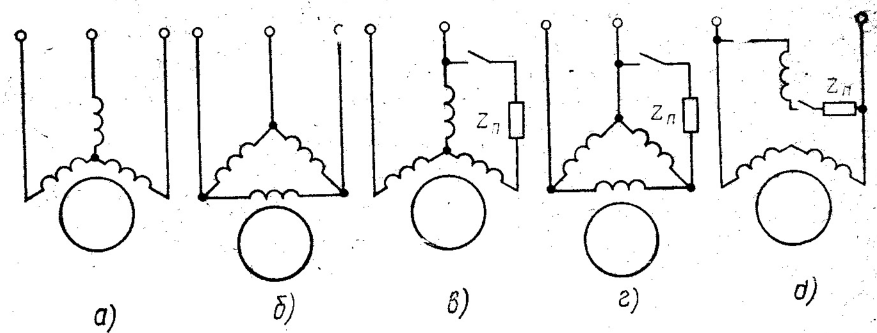


Рис. 5.1. Схемы соединения трехфазного и однофазных асинхронных двигателей

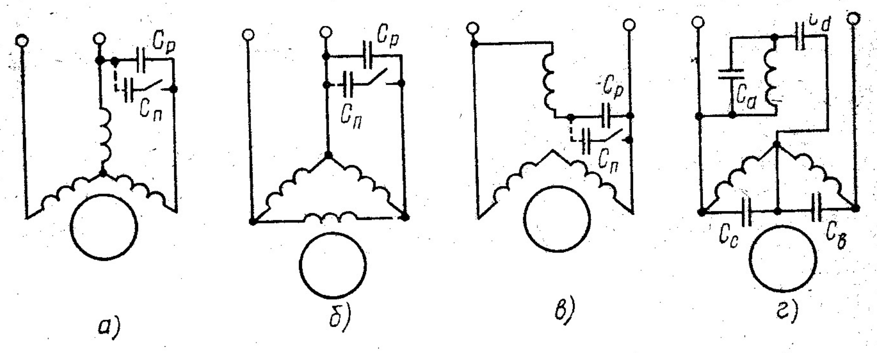


Рис. 5.2. Схемы соединения конденсаторных асинхронных двигателей с рабочей и пусковой емкостями или с одной рабочей емкостью

Конденсаторные двигатели, полученные из трехфазных, показаны на рис. 5.2. Различаются двигатели с постоянно включенной рабочей емкостью $C_р$ и пусковой емкостью $C_п$, отключаемой после пуска, и с одной рабочей емкостью $C_р$. Во всех конденсаторных двигателях: с соединением обмоток в симметричную звезду (рис. 5.2, *а*) или треугольник (рис. 5.2, *б*), с последовательно-параллельным соединением обмоток (рис. 5.2, *в*) и соединением в несимметричную звезду (рис. 5.2, *г*) — три фазы используются не только при пуске, но и при работе. Напряжение однофазной сети равно линейному напряжению исходной трехфазной машины.

В большинстве схем включения трехфазного двигателя в однофазную сеть номинальная мощность снижается. Однако схема, приведенная, например, на рис. 5.2, *г*, позволяет сохранить номи-

нальную мощность трехфазного двигателя при включении его в однофазную сеть.

Рассмотренные схемы соединения обмоток и фазосмещающих элементов могут быть рекомендованы для двигателей малой мощности как по своим показателям, так и по простоте их исполнения. Существует еще ряд однофазных схем включения трехфазных двигателей [20].

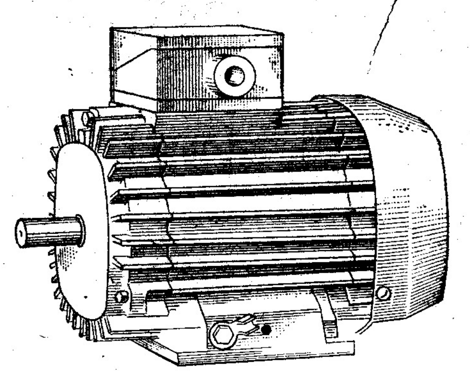


Рис. 5.3. Общий вид асинхронного двигателя 4АА56А4

Исследования, проведенные на кафедре электрических машин МЭИ [3], показали, что рабочие и пусковые свойства различных модификаций универсального двигателя приближаются к рабочим и пусковым свойствам двигателей, специально

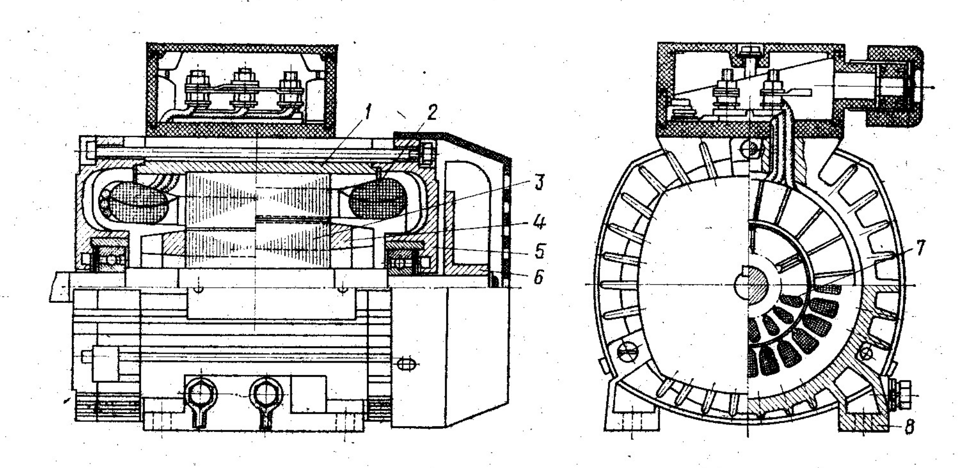


Рис. 5.4. Конструкция асинхронного двигателя 4АА56А4:

1 — станина; *2* — обмотка статора; *3* — сердечник ротора; *4* — короткозамыкающие кольца и вентиляционные лопатки; *5* — подшипниковые щиты; *6* — вентилятор; *7* — стержень; *8* — лапы

спроектированным только для одной схемы, а иногда и превосходят их.

Цель экспериментальных исследований универсального асинхронного двигателя — изучить наиболее распространенные схемы включения трехфазных двигателей в однофазную сеть, исследовать их рабочие и пусковые свойства, а также сравнить характеристики универсального и трехфазного двигателей.

Объектом исследования могут служить трехфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором серий 4АА, УАД, АОЛ, ДА.

Общий вид двигателя новой серии 4АА56А4 представлен на рис. 5.3; на рис. 5.4 приведена его конструкция. Двигатель имеет закрытое обдуваемое исполнение.

Для сравнения в табл. 5.1 приведены данные двигателей трех- и однофазных, выполненных в одном габарите. В этой же таблице приведены допустимые отклонения отдельных величин, регламентируемые ГОСТ 16264—78 для двигателей малой мощности общего назначения.

ПРОГРАММА РАБОТЫ

А. Экспериментальные исследования

1. Ознакомиться с конструкцией асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и его паспортными данными.

2. Исследовать рабочие и пусковые свойства трехфазного двигателя:

а) снять рабочие характеристики I_S, P_S, P_R, n, $\cos\varphi$, η в зависимости от M при $U=U_н$;

б) измерить начальные пусковые момент и коэффициент мощности, а также ток при $U=U_н$.

3. Исследовать рабочие и пусковые свойства однофазного двигателя с пусковыми элементами (см. рис. 5.1):

а) снять рабочие характеристики I_S, P_S, P_R, n, $\cos\varphi$, η в зависимости от M при $U=U_н$;

б) снять кривые начальных моментов $M_к$ и тока $I_к$ в зависимости от пусковой емкости $C_п$ при $U=U_н$.

4. Исследовать рабочие свойства конденсаторного двигателя для различных схем включения (см. рис. 5.2):

а) рассчитать рабочую емкость;

б) снять рабочие характеристики I_A, I_B, I_S, P_A, P_B, P_S, P_R, n, $\cos\varphi_A$, $\cos\varphi_B$, $\cos\varphi$, η в зависимости от M при $U=U_н$.

Б. Расчеты и построения

На основании результатов экспериментального исследования:

1. Построить на одном графике механические характеристики $M=f(s)$ трехфазного, однофазного и конденсаторного двигателей в диапазоне скольжений от $s=0$ до $s=1$ (неустойчивую часть характеристики показать штриховой линией).

2. Построить на одном графике зависимости I_S, $P_S=f(M)$ для трехфазного, однофазного и конденсаторного двигателя.

3. Построить на одном графике зависимости η, $\cos\varphi$ в зависимости от M для трехфазного, однофазного и конденсаторного двигателя.

4. Построить кривые начальных пусковых моментов $M_к$ и токов $I_к$ в зависимости от пусковой емкости $C_п$.

Таблица 5.1

Тип двигателя	Номинальные данные: полезная мощность $P_{Rн}$, Вт	напряжение $U_н$, В	частота вращения $n_н$, об/мин	ток I_S, А	КПД η, %	коэффициент мощности cos φ	Емкость конденсатора C, мкФ	Кратности: максимального момента k_M	пускового момента $k_п$	пускового тока k_i	Добротность пуска, k_D	Схема включения обмоток
4АА56А4	120	380/220	1370	0,44/0,76	63	0,66	—	2,2	2,0	5,0	0,40	
4ААТ56А4	90	220	1390	1,00	53	0,90	12	1,6	0,4	4,0	0,10	C_p, $C_п$
4ААУТ56А4							12/50	1,6	1,6	5,0	0,08	
4ААЕ56А4	60	220	1380	1,05	37	0,70	—	1,5	1,0	7,5	0,133	
4ААУ56А4							10	1,5	1,6	4,0	0,40	$C_п$

Продолжение табл. 5.1

Тип двигателя	Номинальные данные: полезная мощность $P_{Rн}$, Вт	напряжение $U_н$, В	частота вращения $n_н$, об/мин	ток I_S, А	КПД η, %	коэффициент мощности cos φ	Емкость конденсатора C, мкФ	Кратности: максимального момента k_M	пускового момента $k_п$	пускового тока k_i	Добротность пуска, k_D	Схема включения обмоток
УАД-72	70	220	2700	0,40	65	0,50	—	1,5	1,5	6,0	0,25	
	50	220	2750	0,42	60	0,80	5	1,5	0,1	5,0	0,02	C_p
Допустимые отклонения величин	—	±10%	±20%	—	η*	$\frac{1-\cos\varphi}{6}$ не менее 0,02 и не более 0,07	±10%	−10%	−15%	+20%	—	

* 0,5>η>0,25 не более 0,125 (1—η); η>0,15 не более 0,15 (1—η).

5. Построить векторную диаграмму конденсаторного двигателя для последовательно-параллельного соединения обмоток статора в номинальном режиме работы.

6. Сравнить рабочие и пусковые свойства трех- и однофазных двигателей.

7. Рассчитать для трех- и однофазных двигателей с помощью ЭВМ:

а) значение пусковой емкости для заданных кратностей пускового момента $k_п=1{,}5$ и $k_п=2$;

б) комплексный показатель качества.

ПОЯСНЕНИЯ И УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

Перед началом испытаний следует ознакомиться с номинальными (паспортными) данными двигателя в трехфазном режиме $U_н$, $I_{н\,III}$, $P_{R\,н\,III}$ и $n_{н\,III}$ ($s_{н\,III}$) и рассчитать номинальный момент трехфазного двигателя (Н·м):

$$M_{н III}=P_{R н III}/(0{,}105 n_{н III}),$$

где $P_{R н III}$ — полезная мощность двигателя, Вт; $n_{н\,III}$ — номинальная частота вращения, об/мин.

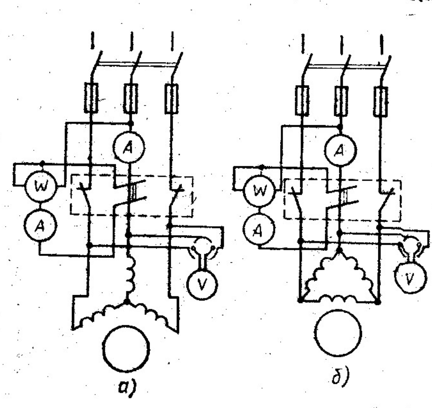


Рис. 5.5. Схема для исследования трехфазного двигателя при включении обмоток статора в звезду (*а*) и треугольник (*б*)

Все опыты для трехфазных двигателей провести по схеме, изображенной на рис. 5.5, для однофазных двигателей с пусковым сопротивлением и конденсаторных двигателей — по схеме, изображенной на рис. 5.6, *а—в*.

Измерительные приборы следует подбирать в соответствии с номинальными данными, учитывая отклонения измеряемых величин для исследуемых режимов (холостой ход, рабочий и пусковой режимы). Рекомендуется пользоваться приборами с малым собственным потреблением и выбирать такие схемы включения приборов, которые обеспечивают минимальную погрешность (см. § 1.1).

Рабочие характеристики для различных схем универсального двигателя. Рабочие характеристики снимаются для трехфазного, однофазного и конденсаторного двигателей.

Трехфазный двигатель. Рабочие характеристики трехфазного двигателя I_S, P_S, P_R, n, $\cos\varphi$, η в зависимости от M при $U=U_н=\text{const}$ снимаются по схеме, приведенной на рис. 5.5, при изменении момента на валу от нуля (холостой ход) до максимального (опрокидывающего) момента $M_{макс}$, соответствующего максимальному отклонению стрелки тормоза.

Следует измерить все величины при номинальном моменте $M_{н\ ш}$ и проверить соответствие номинальных данных паспортным. После получения рабочих характеристик следует измерить пусковые * момент и ток двигателя.

Нагрузка двигателя и измерение вращающего момента производятся с помощью электромагнитного тормоза (описание тормоза

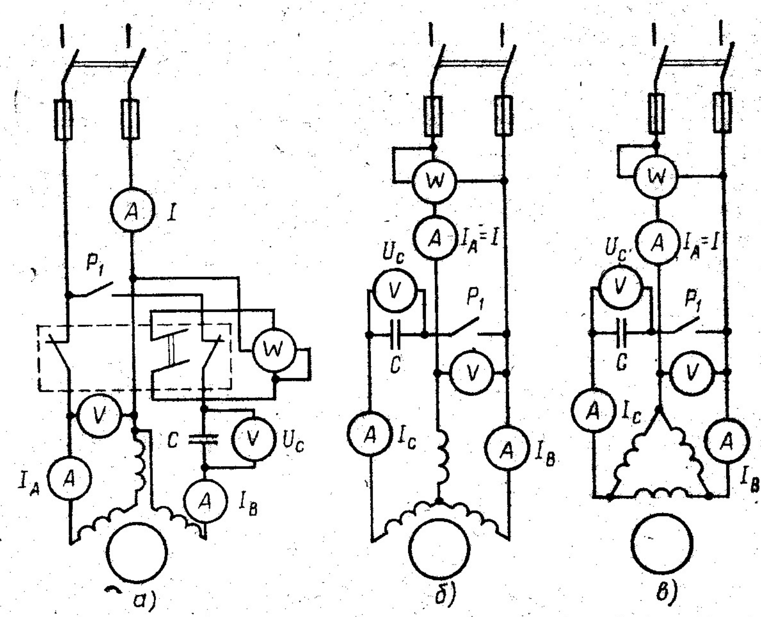


Рис. 5.6. Схемы для исследования трехфазного двигателя при работе от однофазной сети и включении обмоток статора последовательно-параллельно (*а*), в звезду (*б*) и треугольник (*в*)

и его градуировку см. § 2.2). Частота вращения двигателя измеряется строботахометром. Измеряются также линейные напряжения U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}, подводимые к двигателю, потребляемая мощность P_α и P_β и токи I_A, I_B, I_C во всех фазах. Запись результатов измерения и расчета рекомендуется свести в таблицу. Расчетные величины определяются по следующим формулам:

полезная мощность (Вт)

$$P_R = 0{,}105Mn, \tag{5.1}$$

где M — момент на валу, Н·м; n — частота вращения, об/мин;

коэффициент полезного действия

$$\eta = P_R/P_S, \tag{5.2}$$

где $P_S = P_\alpha + P_\beta$ — мощность, потребляемая из сети, Вт;

---

* Здесь и в дальнейшем под терминами «пусковой момент» и «пусковой ток» подразумеваются начальные пусковые момент и ток при $s=1$.

коэффициент мощности

$$\cos \varphi = P_S / (\sqrt{3} U I), \quad (5.3)$$

где U и I — линейные напряжение и ток;

скольжение

$$s = (n_с - n) / n_с, \quad (5.4)$$

где $n_с$ — синхронная частота вращения, об/мин.

Однофазный двигатель с пусковыми элементами. Для двигателя с пусковыми элементами ($C_п$ или $R_п$) рабочие характеристики I_S, P_S, P_R, n, $\cos \varphi$, η в зависимости от M при $U = U_н$ снимаются по схеме, приведенной на рис. 5.6 при включении одной рабочей обмотки, т. е. при пульсирующем поле, создаваемом обмоткой статора. Как известно, в этом случае пусковой момент равен нулю, поэтому для пуска двигателя в ход используется вспомогательная фаза с включенным в нее пусковым элементом.

За номинальный момент однофазного двигателя с пусковыми элементами следует принимать

$$M_{нI} = (0{,}4 \div 0{,}5)\, M_{нIII}.$$

Методика получения рабочей характеристики однофазного двигателя такая же, как и трехфазного двигателя.

Расчетные величины определяются по формулам (5.1), (5.2), (5.4).

Коэффициент мощности

$$\cos \varphi = P_S / (U I). \quad (5.5)$$

Конденсаторный двигатель. Рабочие характеристики конденсаторного двигателя I_A, I_B, I, P_A, P_B, P_S, P_R, n, $\cos \varphi_A$, $\cos \varphi_B$, $\cos \varphi$, η в зависимости от M при $U = U_н = \text{const}$ снимаются по схеме, приведенной на рис. 5.6, *а*, при последовательно-параллельном включении обмоток статора и включенных рубильнике P_1 и рабочей емкости $C_р$.

Емкость рабочего конденсатора $C_р$ выбирается из условия получения кругового вращающегося поля при номинальном скольжении $s_н = (0{,}75 \div 0{,}8) s_{н\,III}$, где $s_{н\,III}$ — номинальное скольжение в трехфазном режиме. Для конденсаторного двигателя, полученного из трехфазного, условия получения кругового поля (равенство МДС фаз и сдвиг их во времени на 90°), строго говоря, не могут быть выполнены, так как коэффициент трансформации главной и вспомогательной обмоток $k = w_{B\,эф} / w_{A\,эф} = 1/\sqrt{3}$ задан и не зависит от параметров обмотки.

Емкость может быть рассчитана в первом приближении [3]:

$$C_р = 2400 I / (U \cos \varphi), \quad (5.6)$$

где U, I, $\cos \varphi$ — линейные напряжения и ток, коэффициент мощности трехфазного двигателя в номинальном режиме.

При любом другом скольжении у конденсаторного двигателя поле в машине — вращающееся эллиптическое.

За номинальный момент конденсаторного двигателя следует принимать $M_{н\,II} = (0,7 \div 0,8)\ M_{н\,III}$.

Методика получения рабочей характеристики конденсаторного двигателя такая же, как и трехфазного двигателя. Для каждого момента M измеряется U_C — напряжение на конденсаторе. Расчетные величины определяются по формулам (5.1), (5.2), (5.4).

Коэффициенты мощности определяются для каждой фазы в отдельности по формулам $\cos\varphi_A = P_A/(U_A I_A)$, $\cos\varphi_B = P_B/(U_B I_B)$ и для двигателя — по формуле (5.5).

Для номинального режима конденсаторного двигателя строится векторная диаграмма токов и напряжений (рис. 5.7) по измеренным значениям. Диаграмма показывает соотношение токов в фазах и сети, напряжений сети, конденсатора и фазы B, а также позволяет оценить отклонение от условий получения кругового вращающегося поля в машине.

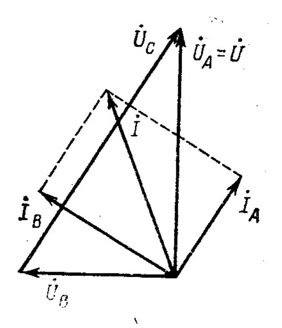


Рис. 5.7. Векторная диаграмма конденсаторного двигателя при последовательно-параллельном включении обмоток статора

Рабочие характеристики конденсаторного двигателя, у которого обмотка статора соединена в симметричную звезду или треугольник, снимаются по схемам, приведенным на рис. 5.6, *б, в,* при включенном рубильнике P_1 и емкости $C_р$. Для этих схем результаты измерения сводятся в таблицу, расчеты производятся по формулам (5.1), (5.2).

Исследуется распределение токов в каждой из фаз, напряжения на конденсаторе; определяется коэффициент мощности для двигателя по формуле (5.5). Значение рабочей емкости в микрофарадах при обеих схемах включения находится по формуле [3]

$$C_р = 2750 I / (U \sqrt{1 - \cos\varphi}) , \qquad (5.7)$$

где U, I, $\cos\varphi$ — линейные напряжения и ток, коэффициент мощности трехфазного двигателя в номинальном режиме.

Для трехфазных двигателей с номинальными напряжениями 220/127 В исследуется схема, изображенная на рис. 5.6, *б,* а с напряжениями 380/220 В — схема на рис. 5.6, *в.* Для схемы включения обмотки статора в несимметричную звезду (см. рис. 5.2, *г*) значения рабочих емкостей определяют по формулам

$$\left.\begin{aligned} C_a = C_c &= [10^6 I_ф / (2\pi f U_ф)] (\sin\varphi - \cos\varphi/\sqrt{3}) ; \\ C_b &= [10^6 I_ф / (2\pi f U_ф)] (\sin\varphi + \cos\varphi/\sqrt{3}) ; \\ C_d &= [10^6 I_ф / (2\pi f U_ф)] (\cos\varphi/\sqrt{3}). \end{aligned}\right\} \qquad (5.8)$$

В формулах (5.8) используются фазные напряжение и ток, коэффициент мощности, измеренные в номинальном режиме исходного трехфазного двигателя.

Определение начальных пусковых моментов и токов. Пусковые свойства двигателя характеризуются его пусковым моментом $M_к$ и пусковым током $I_к$. Для микродвигателей при условии быстрого выполнения опыта можно измерить $M_к$, $I_к$ и коэффициент мощности $\cos\varphi$ при номинальном напряжении. Для сравнения пусковых свойств двигателя при различных схемах включения обмоток статора вычисляются кратности пусковых моментов $k_п = M_к/M_н$ и тока $k_i = I_к/I_н$ ($M_н$ и $I_н$ — номинальные момент и ток для соответствующей схемы включения двигателя). Пусковые момент и ток определяются при номинальном напряжении $U_н$ для трехфазных (рис. 5.5) и однофазных (рис. 5.6) двигателей. Для однофазных двигателей $M_к$ определяется в зависимости от пусковой емкости $C_п$. Пусковую емкость следует изменять от значения рабочей емкости $C_р$ до емкости, обеспечивающей кратность пускового момента $k_п = 1{,}5 \div 2$.

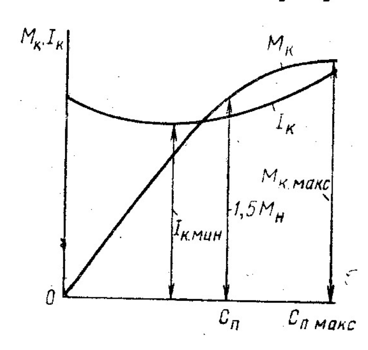


Рис. 5.8. Кривые начальных пусковых момента $M_к$ и тока $I_к$ в зависимости от пусковой емкости

Для получения максимального пускового момента при последовательно-параллельной схеме включения обмоток статора требуется пусковая емкость

$$C_{п.макс} = 3 \cdot 10^6 I_{кA}/(2\pi f U_н), \tag{5.9}$$

где $I_{кA}$ — ток рабочей фазы при пуске и номинальном напряжении $U_н$; f — частота сети.

Пусковое активное сопротивление выбирается так, чтобы получить $k_п = 0{,}8 \div 1{,}5$. Пусковое сопротивление, обеспечивающее наибольший пусковой момент, практически равно кажущемуся сопротивлению вспомогательной фазы:

$$R_{п.макс} = U'_н/(3 I_{кA}). \tag{5.10}$$

На рис. 5.8 показан примерный вид кривых $M_к$, $I_к$ в зависимости от $C_п$. При определенных сопротивлениях пускового элемента достигаются максимальный пусковой момент и минимальный пусковой ток. Характер этих зависимостей иллюстрируется круговой диаграммой [3].

Наибольший пусковой момент при допустимых по нагреванию токах может быть достигнут у однофазных двигателей с пусковой емкостью до $(2 \div 3{,}5)\ M_н$. У трехфазных двигателей пусковой момент колеблется от 1,2 до 2,5 $M_н$, а у большинства двигателей с пусковым сопротивлением пусковой момент не превышает $(1{,}0 \div 1{,}5)\ M_н$.

Пусковой ток получается наибольшим у однофазных двигателей с пусковым сопротивлением $(6 \div 9)\ I_н$, у двигателей с пусковой емкостью он резко снижается до $(3 \div 5) I_н$, у трехфазных двигате-

лей пусковой ток изменяется в пределах $(3\div6)I_н$. Следует иметь в виду, что максимумы пускового момента и пускового тока не совпадают. Выбор значения пускового элемента производится в зависимости от поставленных требований. У двигателей с пусковой емкостью значение емкости выбирают чаще всего из условий получения заданного пускового момента или максимальной добротности пуска, т. е. наибольшего отношения $k_D=k_п/k_i$. Иногда ставится требование ограничения пускового тока.

Расчет пусковых элементов и комплексного показателя качества с помощью ЭВМ. Значения пусковых емкостей для заданных кратностей пусковых моментов, равных 1,5 и 2,0 при различных схемах включения универсального двигателя в однофазную сеть, и комплексный показатель качества могут быть определены с помощью ЭВМ. Известными считаются фазное сопротивление двигателя $Z_к=U_{нф}/I_{кф}$ и коэффициент мощности $\cos\varphi_к$ при пуске, а также кратность пускового момента трехфазного двигателя $k_{п\,III}=M_{к\,III}/M_{н\,III}$.

Сопротивление пусковых конденсаторов (Ом)

$$x_C=bZ_к/(a-\sqrt{a^2-4}). \qquad (5.11)$$

При соединении обмоток в симметричную звезду, треугольник и последовательно-параллельном соединении (рис. 5.1, *в, г, д*) соответственно

$$b=1;\ a=2\sin\varphi_к+\sqrt{3}k_{п\,III}\cos\varphi_к/k_п;$$

$$b=1;\ a=2\sin\varphi_к+k_{п\,III}\cos\varphi_к/(\sqrt{3}k_п);$$

$$b=2;\ a=2\sin\varphi_к+\sqrt{3}k_{п\,III}\cos\varphi_к/k_п.$$

Пусковая емкость (мкФ)

$$C_п=10^6/(2\pi f x_C). \qquad (5.12)$$

Комплексный показатель технико-эксплуатационных качеств двигателя находится согласно [3]:

$$Q=\sum m_i\bar{q}_i, \qquad (5.13)$$

где m_i и $\bar{q}_i$ — коэффициенты весомости и относительные показатели i-го качества.

Для двигателей общепромышленного назначения в комплексный показатель технико-эксплуатационных качеств входят: КПД η ($m_\eta=0{,}16$); коэффициент мощности $\cos\varphi$ ($m_{\cos\varphi}=0{,}08$); отношение массы двигателя к номинальной мощности $G/P_н$ ($m_{G/P_н}=0{,}18$); условный объем $V_{усл}$ ($m_{V\,усл}=0{,}14$); кратность пускового тока k_i ($m_{ki}=0{,}06$); кратность пускового момента $k_п$ ($m_{kп}=0{,}15$); кратность максимального вращающего момента k_M ($m_{kM}=0{,}1$).

Условный объем (мм³)

$$V_{усл}=4H^2(L-l), \qquad (5.14)$$

где H — высота оси, мм; L, l — общая длина машины и выступающих концов вала, мм.

Относительные показатели качества находят либо как $\bar{q}_i = q_i/q_б$ (если у лучшей машины показатель должен быть выше), либо как $\bar{q}_i = q_б/q_i$ (если он должен быть ниже), где q_i и $q_б$ — показатели качества исследуемого и базового двигателей.

За базовые показатели следует принять данные лучшего двигателя из сравниваемых. Рассчитываемый комплексный показатель для двигателей высшей категории должен быть $Q \geqslant 0{,}94$.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

При исследовании рабочих и пусковых свойств трех- и однофазных двигателей следует сравнить механические характеристики $M = f(s)$, рабочие характеристики I_S, P_S, $\cos\varphi$, η в зависимости от M и пусковые показатели $k_п$ и k_i, снятые при номинальном линейном напряжении.

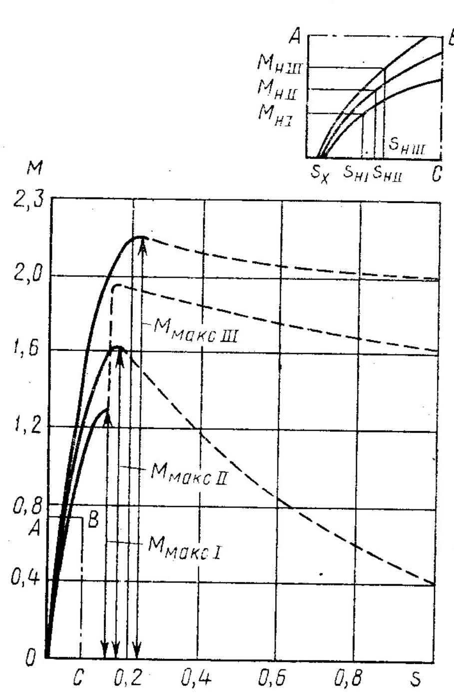


Рис. 5.9. Механические характеристики трехфазного и однофазных двигателей

На рис. 5.9 приведены кривые $M = f(s)$ для трех- и однофазных двигателей и показаны номинальные моменты $M_{нIII}$, $M_{нII}$, $M_{нI}$ трехфазного, конденсаторного и однофазного двигателей с пусковой емкостью, а также соответствующие им скольжения $s_{нIII}$, $s_{нII}$, $s_{нI}$.

Перегрузочная способность трехфазных двигателей $k_M = 1{,}6 \div 3$, кратность пускового момента $k_п = 1{,}2 \div 2{,}5$.

Из рассмотрения кривых видно, что максимальный момент однофазного двигателя с пусковой емкостью $M_{макс I}$ уменьшается почти вдвое по сравнению с моментом трехфазного двигателя. При сохранении перегрузочной способности $k_M = M_{макс}/M_н$ его номинальный момент $M_{нI}$ уменьшается до 40—50% от $M_{нIII}$. Снижение максимального и номинального моментов обусловлено влиянием обратного поля, создающего тормозной момент. В режиме холостого хода влияние обратного поля на момент почти исчезает, а прямое поле в однофазной машине такое же, как в трехфазной машине (при условии, что напряжение рабочей обмотки

однофазного двигателя равно линейному напряжению). Частоты вращения холостого хода одно- и трехфазных двигателей практически одинаковы, так как механические потери постоянны. Неустойчивая часть характеристики момента $M=f(s)$ от $s=s_{макс}$ до $s=1$ показана на рис. 5.9 штриховой линией. Для однофазных двигателей она зависит от типа пускового элемента и его значения.

Для конденсаторного двигателя кривая моментов для скольжений от 0 до $s_{макс}$ занимает промежуточное положение между кри-

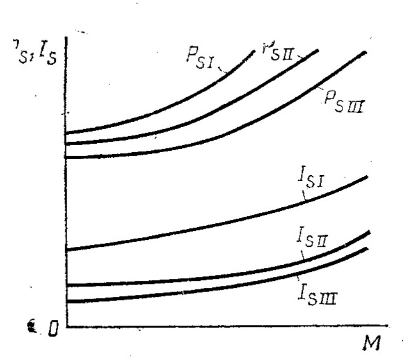


Рис. 5.10. Зависимости потребляемых из сети тока I_S, мощности P_S от вращающего момента M для трехфазного III, конденсаторного II, однофазного с пусковыми элементами I двигателей

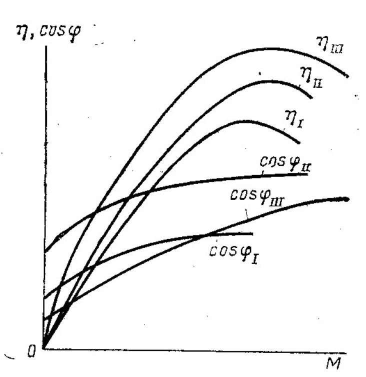


Рис. 5.11. Зависимость коэффициентов полезного действия η, мощности $\cos\varphi$ от вращающего момента M для трехфазного III, конденсаторного II и однофазного с пусковыми элементами I двигателей

выми для трех- и однофазного двигателей. Обратное поле в конденсаторном двигателе обычно меньше, чем в однофазном двигателе с пусковыми элементами.

Наибольшая кратность пускового момента (при $s=1$) достигается у двигателей с пусковой емкостью иногда до $k_п=3\div3{,}5$; такие двигатели применяются для тяжелых условий пуска. В настоящей работе пусковая емкость $C_п$ выбирается так, чтобы получить $k_п=1{,}5\div2$, что соответствует наиболее распространенным значениям. Для двигателя с рабочей и пусковой емкостью принимается та же пусковая емкость $C_п$, что и для двигателя с пусковой емкостью. Пусковой момент у конденсаторных двигателей с одной рабочей емкостью мал: $M_п=(0{,}1\div0{,}55)M_{ном}$, так как при $C_п=C_р$ поле в машине резко эллиптическое; большое влияние оказывает обратное поле. Такие двигатели могут применяться только для легких условий пуска. У двигателей с пусковым сопротивлением пусковой момент составляет $M_п=(0{,}8\div1{,}5)M_{н\,I}$.

На рис. 5.10 приведены зависимости тока сети $I_S=f(M)$ и потребляемой мощности $P_S=f(M)$ от момента на валу для различных схем универсального двигателя. Наибольший ток получается у однофазного двигателя с пусковыми элементами. В режиме хо-

лостого хода ток у однофазного двигателя, как известно, больше, чем у трехфазного, примерно в три раза. Увеличение тока холостого хода объясняется тем, что его реактивная составляющая (намагничивающий ток, затрачиваемый на создание и проведение главного потока) образуется только за счет тока прямой последовательности. При нагрузке однофазного двигателя его ток резко увеличивается из-за токов обратной последовательности. По той же причине увеличивается и ток конденсаторного двигателя в сравнении с трехфазным, но в меньшей степени, так как влияние токов обратной последовательности у этого типа двигателей меньшее.

Наибольшую мощность из сети потребляет однофазный двигатель, работающий при пульсирующем поле статора. Его потери возрастают вследствие увеличения тока, а также потерь в стали от поля обратной последовательности. Наименьшую мощность из сети потребляет трехфазный двигатель, работающий при круговом вращающемся поле, он имеет и наибольший коэффициент полезного действия (рис. 5.11). Максимум КПД у однофазных двигателей смещается в сторону меньших нагрузок, так как потери, не зависящие от нагрузки (в стали и механические), изменяются мало, а переменные электрические потери возрастают из-за увеличения тока. Коэффициенты мощности для различных двигателей показаны на рис. 5.11. Наибольший $\cos\varphi=0{,}90\div0{,}99$ имеют конденсаторные двигатели; он превышает коэффициент мощности трехфазных двигателей.

Данные, характеризующие рабочие и пусковые свойства универсального двигателя, при различных схемах включения обмоток статора рекомендуется для сравнения выписать в отдельную таблицу.

При сравнении исходной величиной является номинальный момент трехфазного двигателя $M_{\text{н III}}$. Номинальные моменты однофазных двигателей принимают соответственно для двигателя с пусковыми элементами $M_{\text{н I}}=(0{,}4\div0{,}5)M_{\text{н III}}$, для конденсаторного двигателя $M_{\text{н II}}=(0{,}7\div0{,}8)M_{\text{н III}}$.

Все величины, характеризующие номинальный рабочий режим: скольжение $s_{\text{н}}$, полезную мощность $P_{R\,\text{н}}$, ток сети $I_{\text{н}}$, коэффициент полезного действия $\eta_{\text{н}}$, коэффициент мощности $\cos\varphi_{\text{н}}$, — находят из рабочих характеристик данного типа двигателя для его номинального момента. Перегрузочную способность k_M и кратность пускового момента $k_{\text{п}}$ определяют по отношению к номинальному моменту для данного типа двигателя, а кратность пускового тока k_i — по отношению к номинальному току данного двигателя.

Наиболее простой схемой включения конденсаторного двигателя с рабочей емкостью является схема, в которой обмотки статора включены в симметричную звезду (см. рис. 5.2, *а*). По сравнению с последовательно-параллельным включением обмоток (см. рис. 5.2, *в*) удается получить более равномерное распределение токов и потерь по фазам и несколько увеличить КПД. При включении обмоток статора в несимметричную звезду и использовании четырех емкостей удается за счет усложнения схемы (см. рис.

5.2, *г*) достичь у конденсаторного двигателя той же номинальной мощности, что у исходного трехфазного. Однако перегрузочная способность и пусковые показатели оказываются худшими.

Вопросы для самопроверки

1. Назовите наиболее распространенные схемы включения трехфазного асинхронного двигателя в однофазную сеть.

2. Каков характер поля в двигателях трехфазном, однофазном с пусковыми элементами (в рабочем режиме), конденсаторном с рабочей емкостью?

3. При каком скольжении в двигателях с пусковым элементом и конденсаторном (с рабочим и пусковым конденсатором) целесообразно отключить соответственно пусковую обмотку и пусковую емкость?

4. Какие показатели характеризуют рабочий и пусковой режимы асинхронного двигателя? Чему они равны для трехфазного, конденсаторного и однофазного двигателей?

5. В какой из исследуемых схем включения трехфазного двигателя можно получить лучшие: а) рабочие свойства; б) пусковые свойства?

6. Каким образом выбираются рабочая и пусковая емкость в конденсаторном двигателе? пусковое сопротивление и пусковая емкость в однофазном двигателе с пусковыми элементами?

7. При каком пусковом элементе в однофазном двигателе получится наименьший пусковой ток при одном и том же значении вращающего момента на валу?

8. Какая из схем включения трехфазного двигателя в однофазную сеть позволяет получать наибольшую полезную мощность? Чему она равна по сравнению с полезной мощностью исходного трехфазного двигателя?

9. Почему ток холостого хода однофазного двигателя с пусковым элементом больше, чем у трехфазного двигателя?

10. Сравните энергетическую диаграмму трех- и однофазного асинхронных двигателей и объясните, почему у трехфазного двигателя коэффициент полезного действия больше.

11. Как можно проверить, что в асинхронном конденсаторном двигателе создано круговое вращающееся поле в номинальном режиме? в режиме пуска?

12. Как изменить направления вращения в асинхронном конденсаторном двигателе? Можно ли реверсировать двигатель на ходу?

§ 5.2. ОДНОФАЗНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С ЭКРАНИРОВАННЫМИ ПОЛЮСАМИ

Однофазные явнополюсные асинхронные двигатели мощностью от долей ватта до нескольких десятков ватт широко применяются для привода приборов микроклимата (вентиляторов, тепловентиляторов, воздухоочистителей, климатизеров, увлажнителей) и приборов личной гигиены (фенов, рукосушителей). Они используются также в бытовых магнитофонах, рекламных устройствах, проигрывателях, кино- и диапроекторах, игрушках. Самым распространенным типом является двигатель с экранированными полюсами (АДЭП), имеющий короткозамкнутые витки на полюсах. Выпускаются также явнополюсные конденсаторные двигатели (АДКЯ) и двигатели с асимметричным статором (АДА).

Конструктивные схемы наиболее распространенных отечественных асинхронных явнополюсных микродвигателей показаны на рис. 5.12. На рис. 5.13 приведена конструкция двигателя с экранированными полюсами типа ДВ2. Двигатели чаще всего выполняют-

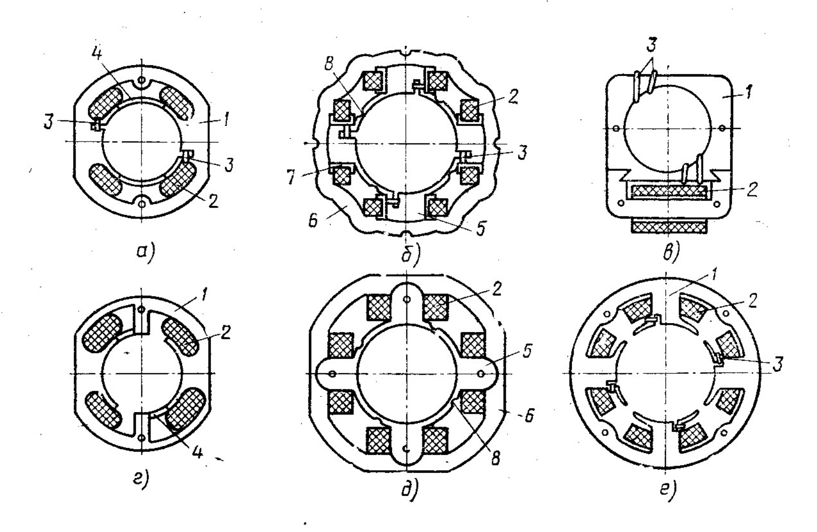


Рис. 5.12. Конструктивные схемы однофазных асинхронных явнополюсных двигателей:

1 — сердечник статора; *2* — обмотка статора; *3* — короткозамкнутый виток; *4* — магнитный шунт; *5* — крестовина; *6* — спинка статора; *7* — пластмассовый каркас; *8* — мостик насыщения

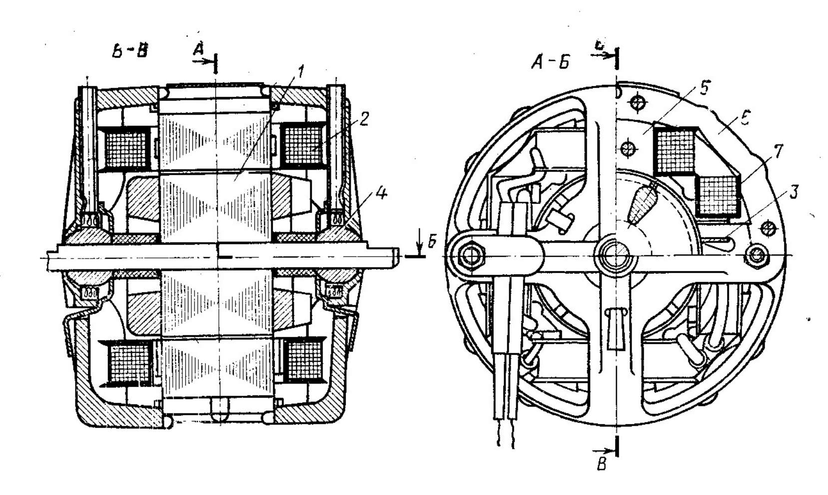


Рис. 5.13. Конструкция двигателя с экранированными полюсами ДВ2:

1 — ротор; *2* — обмотка статора; *3* — короткозамкнутый виток; *4* — подшипник скольжения; *5* — крестовина; *6* — спинка статора

ся двух- или четырехполюсными с неразъемным (рис. 5.12, *а, в, г, е*) и с разъемным пакетом статора, состоящим из крестовины и ярма (рис. 5.12, *б, д*). У АДЭП часть полюса ($^1/_5$—$^1/_3$ полюсной дуги) экранируется короткозамкнутым витком, для размещения которого на полюсах имеются специальные пазы. Короткозамкнутые витки выполняются из алюминия или меди. Обмотка статора у всех машин сосредоточенная, выполняется в виде катушек с внешней изоляцией, надеваемых на полюса. Иногда обмотка статора располагается на пластмассовом каркасе, в этом случае она может и не иметь внешней изоляции.

Имеются АДЭП, у которых обмотка статора вынесена (рис. 5.12, *в*). Обмотка статора подключается к однофазной сети переменного тока. Между явновыраженными полюсами статора находятся магнитные шунты. Они выполняются либо вставными равномерного сечения, либо, как в двигателях с разъемным статором, выполняются вместе с полюсами в виде единой крестовины и обычно имеют переменное сечение (рис. 5.12, *б, д*). В АДЭП магнитные шунты увеличивают взаимосвязь между главной обмоткой статора и короткозамкнутыми витками, выполняющими функцию вспомогательной обмотки. Они также улучшают форму и характер поля в воздушном зазоре.

В двигателях с асимметричным статором (рис. 5.12, *г*) кроме главных полюсов есть вспомогательные; магнитный шунт вставной. На статоре имеется только обмотка возбуждения, магнитная асимметрия создается за счет разных толщин ярем на отдельных участках. В явнополюсных конденсаторных двигателях при $2p=2$ в каждой фазе имеются две катушки обмотки возбуждения, оси фаз смещены в пространстве на электрический угол в 90°. На рис. 5.12, *д* показан конденсаторный двигатель с разъемным статором, имеющий полюсный сердечник (крестовину), совмещенный с шунтами переменного сечения. Иногда такой шунт имеет специальный мостик насыщения (рис. 5.12, *б, д*).

Двигатели выполняются и с магнитной системой, не имеющей магнитных шунтов (рис. 5.12, *е*), в этом случае полюсные наконечники сближены между собой. Известны конструкции совмещенных двигателей-трансформаторов, предназначенных для кассетного магнитофона.

Принцип действия АДЭП основан на создании *эллиптического вращающегося поля,* образованного из-за *пространственного сдвига* (на электрический угол $\Theta=30\div60°$) и *сдвига по фазе во времени* между потоками в неэкранированной и экранированной частях полюса. Если не учитывать реакцию ротора и влияние магнитных шунтов, то можно рассматривать обе обмотки как двухобмоточный трансформатор, у которого вторая обмотка замкнута (рис. 5.14). Короткозамкнутый виток, по которому протекает ток $I_к$, создает поле реакции $\Phi_к$, стремящееся ослабить поле в экранированной части полюса Φ_1'', созданное главной обмоткой. Суммарный поток, пронизывающий короткозамкнутый виток (поток экранированной части полюса) $\Phi=\Phi_1''+\Phi_к$ наводит в короткозамкнутом

витке ЭДС $E_к$. Он сдвинут по отношению к потоку неэкранированной части полюса Φ_1' на некоторый сравнительно небольшой угол γ. Таким образом, за счет экранирующего действия короткозамкнутого витка создается эллиптическое вращающееся поле, под действием которого ротор приходит во вращение в направлении от неэкранированной части полюса к экранированной. Пусковой момент двигателя $M_к = k\Phi_1'\Phi \sin\gamma$ сравнительно невелик.

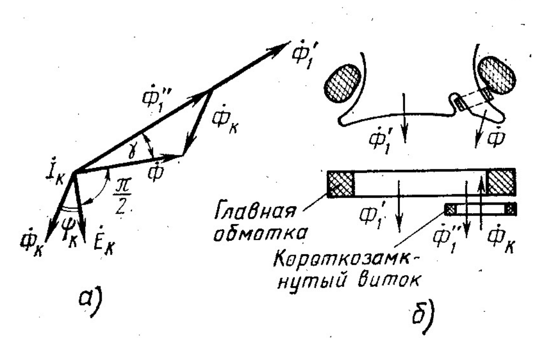


Рис. 5.14. Упрощенная векторная диаграмма АДЭП (*а*) и картина распределения потоков (*б*)

При выборе наилучшей конструкции и технологии изготовления для АДЭП главным является стремление получить наиболее совершенное поле в воздушном зазоре машины и приблизить его максимально возможно к круговому, чтобы улучшить энергетические соотношения. Важно подобрать наилучшую кривую поля на полюсном делении — под полюсом и шунтами.

При оптимизации геометрии магнитной цепи особое внимание уделяется уменьшению влияния третьей пространственной гармонической, вызывающей провал в кривой момента и обусловливающей значение минимального вращающего момента. Снижение влияния третьей гармонической поля достигается выбором степени экранирования (при однократном экранировании и электрическом угле, близком к 60°), оптимальной геометрии магнитной цепи и степени насыщения ее отдельных участков, значения и конфигурации воздушного зазора, активного сопротивления короткозамкнутого витка. В частности, применяются двигатели с увеличенным воздушным зазором под частью неэкранированного участка полюса или без короткозамкнутых витков, но со ступенчатым воздушным зазором, и др. Теория двигателя с экранированными полюсами весьма сложна и изложена в специальной литературе.

В последних работах основные уравнения АДЭП получены на основе модифицированного метода симметричных составляющих — метода симметричных режимов, учитывающего электрическую, пространственную и магнитную асимметрию машины. Электромеханические характеристики двигателя определяются либо по эквивалентной первой гармонической поля, либо с учетом всего спектра пространственных гармоник поля.

Из-за сложности электромагнитного расчета АДЭП длительное время характеристики (в частности, КПД, $\cos\varphi$, кратность пускового и максимального моментов, виброакустические показатели) улучшались макетно-экспериментальным методом. Отсюда такое разнообразие конструктивно-технологических решений. Приме-

нение современных методов проектирования с широким использованием ЭВМ способствовало созданию новых единых серий явнополюсных асинхронных микродвигателей с высоким техническим уровнем.

Сравнительные данные явнополюсных асинхронных двигателей разных типов приведены в табл. 5.2. Большинство из них применяется для привода бытовых вентиляторов и должны удовлетворять требованиям ГОСТ 17018—79. На рис. 5.15 показаны зависимости КПД и массы двигателей разных типов от полезной мощности, регламентируемые этим ГОСТом. Допуски на номинальные данные и параметры двигателей оговорены в ГОСТ 16264—78 (см. табл. 5.1). В частности, предельные допустимые отклонения КПД для значений $\eta \leqslant 0,15$ составляют $0,05(1-\eta)$, а для значений $0,15 \leqslant \eta \leqslant 0,25$ равны $-0,08(1-\eta)$.

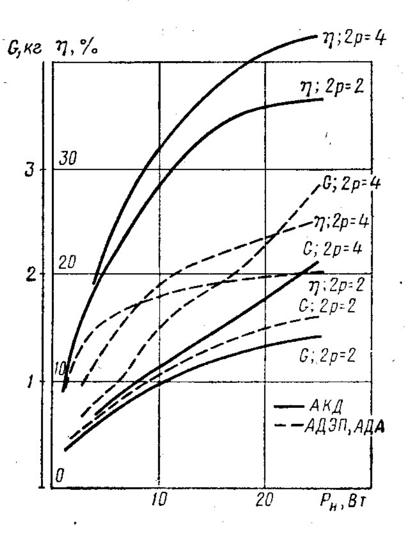


Рис. 5.15. Зависимость КПД и массы двигателя от номинальной мощности по ГОСТ 17018—79

Приведенные сведения об АДЭП хорошо иллюстрируют их достоинства и недостатки. Асинхронные двигатели с экранированными полюсами выделяются из асинхронных микродвигателей простотой конструкции и технологии изготовления, высокой надежностью, удобством в эксплуатации. Они не требуют добавочных фазосмещающих элементов и пусковых устройств, отличаются по сравнению с конденсаторными двигателями с распределенной обмоткой более низкой трудоемкостью изготовления (в 3,8—4,6 раза) и себестоимостью (в 1,6—2,4 раза).

К недостаткам двигателей с экранированными полюсами можно отнести: 1) сравнительно небольшие коэффициенты полезного действия ($\eta = 10 \div 40\%$) и коэффициенты мощности ($\cos\varphi = 0,45 \div 0,7$), что ограничивает применение двигателей этого типа мощностями в несколько десятков ватт; 2) сравнительно малые пусковые моменты ($k_п = M_к/M_н = 0,1 \div 0,7$), обусловливающие применение двигателя в приводах с легкими условиями пуска; 3) отсутствие реверса.

Ц е л ь и с с л е д о в а н и я асинхронных двигателей с экранированными полюсами — изучение их рабочих и пусковых свойств, а также влияния на их характеристики основных конструктивных элементов: короткозамкнутых витков, ротора, магнитных шунтов. В качестве объекта испытания могут использоваться двигатели с экранированными полюсами современных серий.

Таблица 5.2

Тип	Серия	$P_н$, Вт	$2p$	$\eta_н$, %	$G_д$, кг	$k_м$	$k_п$	$\cos\varphi$	L, дБ·А	Цена, руб.	Габаритные размеры, мм			Конструктивная схема, рис. 5.12	Назначение
											А	В	$L-l$		
АДЭП	1ДВЛВ 1,6—2	1,6	2	92,0	0,44	1,60	0,70	0,735	35	2,35	63	79	61	*а*	Вентиляторы
АДА	АД 1,6—2/32А	1,6	2	11,0	0,35	1,60	0,40	—	30	3,50	54	49	56	*г*	»
АДКЯ	КД 1,6—2/32П	1,6	2	11,8	0,52	1,80	0,70	0,905	30	3,78	60	60	62	*д*	Электропроигрыватель и звукозаписывающие устройства
АДЭП	ДВН-8 2ДВЛВ 4—2 Лада	3,3 4,0 3,5	2 2 2	13,2 15,5 15,5	0,64 0,64 —	1,98 2,20 2,00	0,39 0,30 0,88	0,693 0,650 0,440	37 35 34	— 2,40 —	75 75 —	100 100 —	58 58 —	*а* *а* *в*	Вентиляторы » Фен
АДА	АД 4—2/40А	4,0	2	16,5	0,56	1,40	0,45	0,550	30	4,30	63	60	63	*г*	Вентиляторы
АДКЯ	ДКВ 4—2	4,0	2	18,0	0,53	1,20	0,50	0,860	35	6,38	—	—	—	*д*	Вентиляторы, диа- и кинопроекторы
	КД 4—2/40П	4,0	2	20,2	0,69	2,20	1,00	0,825	34	4,59	72	72	60	*д*	Электропроигрывающие и звукозаписывающие устройства

Продолжение табл. 5.2

Тип	Серия	$P_н$, Вт	$2p$	$\eta_н$, %	$G_д$, кг	k_M	$k_ц$	cos φ	L, дБ·А	Цена, руб.	Габаритные размеры, мм			Конструктивная схема рис. 5.12	Назначение
											А	В	$L-l$		
АДЭП	ДВ1	6,0	4	15,0	0,85	1,30	0,40	0,587	40	2,85	75	115	68	*а*	Вентиляторы
	ДВ2	6,0	4	18,4	0,95	1,60	0,40	0,581	36	4,50	75	105	63	*б*	»
	2ДВЛВ 6—2	6,0	2	17,5	0,632	1,50	0,30	0,710	35	2,45	75	105	63	*а*	»
	3ДВЛВ 6—4	6,0	4	13,2	0,86	1,37	0,65	0,590	35	4,50	77	115	68	*б*	»
	АД6—4/40Е	6,0	4	15,8	0,84	1,40	0,60	0,682	30	—	75	75	66	*е*	»
АДА	АД 6—2/36А	6,0	2	18,8	0,68	1,50	0,57	0,570	30	4,70	63	60	68	*г*	Электропроигрывающие и звукозаписывающие устройства
АДКЯ	ДКВ 6—4	6,0	4	26,8	0,84	1,20	0,50	0,930	36	—	—	—	—	*д*	Вентиляторы, диа- и кинопроекторы
	КД 6—2/40П	6,0	2	23,0	0,87	1,85	0,65	0,760	35	5,00	72	72	56	*д*	Электропроигрывающие и звукозаписывающие устройства

ПРОГРАММА ИССЛЕДОВАНИЙ

А. Экспериментальные исследования

1. Ознакомиться с конструкцией асинхронного двигателя с короткозамкнутым витком на полюсе и его паспортными данными.

2. Снять рабочие характеристики двигателя n, I_S, P_S, P_R, $\cos\varphi$, η в зависимости от M при $U=U_н=\text{const}$: а) с короткозамкнутыми витками и магнитными шунтами; б) без короткозамкнутых витков; в) с вынутыми магнитными шунтами.

3. Измерить пусковые ток и момент двигателя: а) с магнитными шунтами; б) с вынутыми магнитными шунтами при $U=0{,}9U_н$ и $U=U_н$.

4. Определить напряжение трогания при различных положениях ротора.

5. Снять кривую разбега $M=f(t)$.

Б. Расчеты и построения

На основании результатов экспериментального исследования:

1. Вычертить эскиз двигателя с короткозамкнутым витком на полюсе. При выполнении эскиза использовать стенд с деталями двигателя.

2. Построить на одном графике кривые моментов $M=f(s)$ для двигателей п. 2а, б, в.

3. Построить рабочие характеристики для двигателей п. 2 а, б, в. На одном графике $I_S=f(M)$, $P_S=f(M)$, на другом — $\eta=f(M)$, $\cos\varphi=f(M)$.

4. Провести анализ результатов испытаний и оценить уровень качества испытуемого двигателя.

ПОЯСНЕНИЯ И УКАЗАНИЯ

Объектом исследования служит однофазный асинхронный микродвигатель с экранированными полюсами. Перед началом работы следует ознакомиться с его номинальными данными $U_н$, $I_н$, $P_н$, $n_н$ и рассчитать номинальный вращающий момент (Н·м):

$$M_н=P_{Rн}/(0{,}105n_н),$$

где $P_{Rн}$ — номинальная полезная мощность, Вт; $n_н$ — номинальная частота вращения, об/мин.

Все опыты проводятся по схеме (рис. 5.16), выбранной из соображений минимальной погрешности на собственное потребление приборов. Перед началом опыта следует оценить погрешность, вносимую приборами (см. гл. 1), и, если потребуется, ввести поправки на собственное потребление приборов. Вольтметр рекомендуется применять электронный или выпрямительный.

В работе исследуются три двигателя одного типа. Один двигатель полностью собран (имеются короткозамкнутые витки и магнитные шунты); у второго двигателя сняты короткозамкнутые витки, у третьего двигателя вынуты магнитные шунты.

Рабочие характеристики и пусковые показатели. Рабочие характеристики и пусковые показатели исследуются для трех типов двигателей с целью выявления роли отдельных конструктивных элементов.

Двигатель с короткозамкнутыми витками и магнитными шунтами. Рабочие характеристики двигателя n, I_S, P_S, P_R, $\cos\varphi$, η в зависимости от M снимаются при постоянном напряжении $U=U_н=\text{const}$ и изменении момента на валу от $M=0$ (холостой ход) до максимального момента $M=M_{макс}$, соответствующего максимальному отклонению стрелки тормоза. Следует измерить все величины при номинальном моменте и проверить соответствие номинальных данных паспортным.

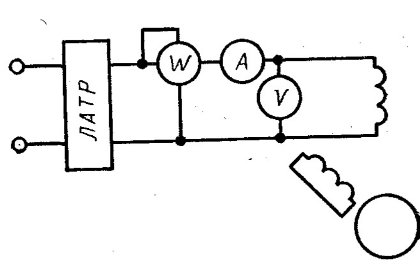


Рис. 5.16. Схема для исследования двигателей с экранированными полюсами

Нагрузка двигателя и измерение момента производятся с помощью ленточного тормоза с маятником (описание тормоза и его градуировку см. в гл. 2). Измерение частоты вращения рекомендуется производить стробоскопическим методом.

При снятии рабочих характеристик измеряются напряжение, подаваемое к двигателю U, потребляемый из сети ток I_S, потребляемая мощность P_S, момент на валу двигателя M и частота вращения n. Результаты измерений и расчета рекомендуется свести в таблицу. Расчетные величины определяются по формулам:

полезная мощность на валу (Вт)

$$P_R=0{,}105Mn, \tag{5.15}$$

где M — момент, Н·м; n — частота вращения, об/мин;

коэффициент полезного действия (%)

$$\eta=100P_R/P_S; \tag{5.16}$$

коэффициент мощности

$$\cos\varphi=P_S/(UI_S); \tag{5.17}$$

скольжение

$$s=(n_с-n)/n_с, \tag{5.18}$$

где $n_с$ — синхронная частота вращения.

Для исследования пусковых свойств двигателя измеряют пусковые токи $I_к$, пусковые моменты $M_к$ и потребляемую мощность при пуске $P_к$. Чтобы оценить влияние понижения напряжения на пусковые показатели, измерения производят при двух значениях напряжения: $U=U_н$ и $U=0{,}9\,U_н$.

Пусковой момент определяют по отклонению стрелки тормоза при остановке двигателя или в момент трогания при пуске.

По данным опытов рассчитывают кратности пусковых токов $k_i = I_к/I_н$ и пусковых моментов $k_п = M_к/M_н$, где $I_н$, $M_н$ — номинальные ток и момент двигателя.

Кроме того, исследуется влияние положения ротора (расположения зубцов ротора по отношению к полюсам статора) на напряжение трогания, т. е. минимальное напряжение, при котором двигатель начинает вращаться. Напряжение трогания вначале определяется при произвольном положении ротора, затем ротор постепенно поворачивается на 20—30°. Напряжение трогания изменяется в широких пределах и учитывается при оценке пусковых свойств двигателя. Необходимо проверить, чтобы при понижении напряжения сети до $U = 0{,}9\,U_н$ (учитывая возможные колебания напряжения сети на $\pm 10\%$) двигатель начинал вращаться при любом положении ротора.

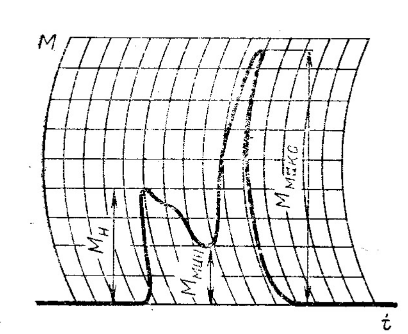


Рис. 5.17. Кривая разбега $M = f(t)$ двигателя с экранированными полюсами, снятая с помощью измерителя ускорений на самописце

Двигатель без короткозамкнутых витков. Так как при снятом короткозамкнутом витке $M_п = 0$, то двигатель предварительно следует разогнать от другой машины (полностью собранной). При запуске от руки или с помощью шнура двигатель может остановиться («застрять») при частоте вращения, равной $^1/_3$ синхронной из-за провала в кривой момента (рис. 5.17).

Методика получения рабочих характеристик аналогична методике для полностью собранной машины.

Двигатель без магнитных шунтов. Рабочие характеристики двигателя без магнитных шунтов снимаются так же, как и для полностью собранной машины. Результаты измерений записываются в таблицу.

Для оценки пусковых свойств двигателя при номинальном напряжении $U = U_н$ измеряются пусковой момент, пусковой ток и мощность при пуске и рассчитываются кратности пусковых тока и момента.

Определение кривой момента. У двигателя с короткозамкнутым витком на полюсе обычно имеется значительный провал в кривой момента $M = f(t)$, обусловленный высшими гармоническими поля в зазоре. Этот провал соответствует третьей гармонической. Особенно резко он проявляется при снятии короткозамкнутого витка. Провал может быть обнаружен и измерен при снятии кривой разбега машины $M = f(t)$, которая записывается с помощью датчика момента на специальном самописце (см. гл. 2) для двигателя с короткозамкнутыми витками и без них. Примерный вид кривой разбега показан на рис. 5.17.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для оценки свойств двигателя с короткозамкнутыми витками на полюсах и выявления влияния его основных конструктивных элементов (короткозамкнутых витков, магнитных шунтов) сравниваются кривые момента $M=f(s)$, рабочие характеристики и пусковые показатели для всех исследуемых двигателей: полностью собранного, без короткозамкнутых витков, без магнитных шунтов.

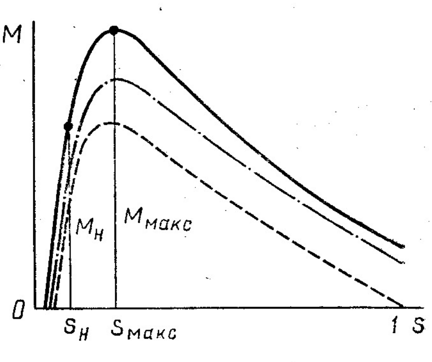


Рис. 5.18. Кривая моментов $M=f(s)$ для двигателей:

——— с короткозамкнутыми витками и магнитными шунтами; — — — без короткозамкнутых витков; —·—·— без магнитных шунтов

Кривые момента $M=f(s)$ представлены на рис. 5.18. В диапазоне скольжений от $s=s_{макс}$ до $s=1$ кривая $M=f(s)$ не снимается (на рис. 5.18 показана идеализированная кривая без учета высших гармонических).

Кривые I_S, P_S, P_R в зависимости от M представлены на рис. 5.19, а кривые η, $\cos\eta$ в зависимости от M — на рис. 5.20. Основные показатели рабочего и пускового режимов: потребляемые ток I_S и мощность P_S, полезная мощность $P_{Rн}$, номинальная частота вращения $n_н$, η, $\cos\varphi$, кратности максимального k_M и пускового $k_п$ моментов, кратность пускового тока k_i — следует свести в таблицу.

Для всех сравниваемых двигателей принимается одно значение номинального вращающего момента. Рассматривая перечисленные характеристики, можно сделать некоторые выводы о свойствах двигателей с короткозамкнутым витком:

1. Наибольший КПД соответствует моменту, близкому к максимальному. Поэтому для лучшего использования двигателя стремятся работать вблизи опрокидывающего момента. Кратность максимального момента невелика: $k_M \geqslant 1{,}3$.

2. Ток двигателя I_S мало меняется от режима холостого хода до режима номинальной нагрузки. При заторможенном роторе ток незначительно увеличивается по сравнению с номинальным. Это можно объяснить, рассматривая двигатель как трехобмоточный трансформатор (главная обмотка, виток, ротор), который находится в режиме короткого замыкания.

Такое изменение тока статора — одно из характерных свойств двигателя. Поэтому двигатель надежен и допускает большое число включений.

3. Короткозамкнутый виток позволяет получить в машине эллиптическое вращающееся поле и создать пусковой момент (см. рис. 5.18). Однако потери в короткозамкнутом витке весьма велики. Поэтому при снятии витка потребляемая мощность и перегрузочная

способность двигателя в ряде случаев заметно снижаются (см. рис. 5.19).

4. Магнитные шунты позволяют повысить вращающий момент (см. рис. 5.18). Это объясняется тем, что они увеличивают взаимосвязь между главной обмоткой и короткозамкнутым витком, а также способствуют созданию более совершенного магнитного поля (улучшают форму поля в зазоре, уменьшают обратное поле).

В двигателе с вынутыми магнитными шунтами значительно увеличиваются потребляемый ток и потребляемая из сети мощность (см. рис. 5.19), что приводит к резкому снижению коэффициента полезного действия (см. рис. 5.20).

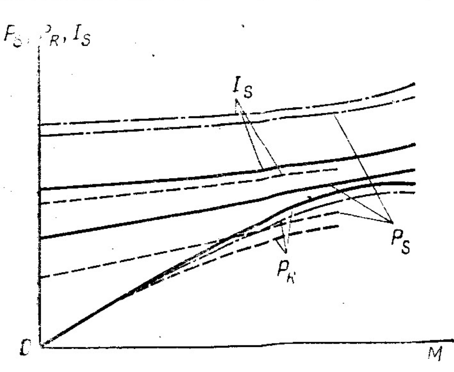


Рис. 5.19. Зависимость тока I_S, мощности потребления P_S, полезной мощности P_R от вращающего момента M для двигателей:

——— с короткозамкнутыми витками и магнитными шунтами; — — — без короткозамкнутых витков; —·—·— без магнитных шунтов

Рис. 5.20. Зависимости коэффициентов мощности $\cos\varphi$, полезного действия η от вращающего момента M для двигателей:

——— с короткозамкнутыми витками и магнитными шунтами; — — — без короткозамкнутых витков; —·—·— без магнитных шунтов

Чтобы оценить уровень качества исследуемого двигателя с экранированными полюсами, следует сравнить его с лучшими отечественными и иностранными двигателями, пользуясь методикой, описываемой ниже.

Коэффициент технического уровня для вентиляторных двигателей определяется по среднегеометрическому показателю

$$k_{yk} = \sqrt[n]{\Pi_n (\bar{q}_i)_k^{m_{\text{в}i}}}, \qquad (5.19)$$

где Π_n — символ произведения n сомножителей относительных показателей качества $\bar{q}_{ik} = q_{ik}/q_{i\text{б}}$ (или $q_{i\text{б}}/q_{ik}$); q_{ik} — абсолютное значение показателя i-го качества для k-го двигателя; $q_{i\text{б}}$ — максимальное значение показателя i-го качества у сравниваемых двигателей; $m_{\text{в}i}$ — коэффициент весомости i-го показателя.

При определении относительного показателя качества его базовое значение $q_{i\text{б}}$ находится в знаменателе, если у лучшего двигателя данный показатель должен быть больше, и в числителе, если — меньше.

Относительный коэффициент уровня качества

$$\overline{k}_{\text{у}k}=k_{\text{у}k}/k_{\text{у.макс}}, \qquad (5.20)$$

где $k_{\text{у.макс}}$ — максимальное значение коэффициента уровня качества у сравниваемых двигателей.

У лучшего двигателя $\overline{k}_{\text{у}k}=1$. Если $k_{\text{у}k}>0{,}95$, то двигателю присваивается высшая категория качества, а если $0{,}85<k_{\text{у}k}\leqslant 0{,}95$, — первая категория качества.

При расчете $k_{\text{у}k}$ с учетом специфики вентиляторных двигателей рекомендуется учитывать пять показателей качества: отношение мощности на валу двигателя при максимальном КПД к массе активных материалов $q_1=P_{R\,\text{макс}}/G_{\text{а}}$, $(m_{\text{в}1}=1)$; максимальный КПД $q_2=\eta_{\text{макс}}$ $(m_{\text{в}2}=1)$; отношение пускового момента к массе активных материалов $q_3=M_{\text{к}}/G_{\text{а}}$ $(m_{\text{в}3}=0{,}8)$; коэффициент мощности при $\eta_{\text{макс}}$ $q_4=\cos\varphi$ $(m_{\text{в}4}=0{,}5)$ и коэффициент уровня звука $q_5=k_{\text{ш}}=10^{-0{,}1\,L}$ $(m_{\text{в}5}=0{,}1)$, L — уровень звука, дБ.

Вопросы для самопроверки

1. Укажите особенности конструкции и объясните принципы действия однофазных явнополюсных асинхронных двигателей с экранированными полюсами, конденсаторного с асимметричным статором.
2. Объясните назначение короткозамкнутых витков.
3. Для чего в конструкции двигателя имеются магнитные шунты? Какие бывают конструктивные исполнения шунтов?
4. Какие рабочие показатели двигателя изменяются и почему, если снять короткозамкнутые витки, но оставить магнитные шунты?
5. Имеет ли двигатель без короткозамкнутых витков пусковой момент, если воздушный зазор под полюсом неравномерный?
6. Укажите направление вращения однофазного асинхронного двигателя с экранированными полюсами.
7. Можно ли реверсировать однофазный асинхронный двигатель с экранированными полюсами?
8. Почему невелики перегрузочная способность и кратность пускового момента вентиляторного двигателя с экранированными полюсами?
9. Как изменяется ток в главной обмотке двигателя с экранированными полюсами при постоянном напряжении сети и изменении режима работы от холостого хода до пуска?
10. Как влияет на свойства двигателя с экранированными полюсами третья пространственная гармоническая?
11. Зависит ли пусковой момент асинхронного двигателя с экранированными полюсами от положения ротора?
12. Где чаще всего применяют однофазные асинхронные двигатели с экранированными полюсами?
13. Каким образом можно снять кривую разбега $M=f(t)$ двигателя с экранированными полюсами?
14. Как оценивается технический уровень вентиляторных двигателей?

§ 5.3. АСИНХРОННЫЙ КОНДЕНСАТОРНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

В схемах автоматики, телемеханики, в бытовых, медицинских приборах, приборах звукозаписи широко используют однофазные асинхронные конденсаторные двигатели. Основные требования к этим двигателям отражены в ГОСТ 16264—78 и 10799—77.

Асинхронный конденсаторный двигатель имеет на статоре две обмотки, сдвинутые в пространстве на электрический угол 90°. Одна из обмоток (главная) подключается к сети непосредственно, другая (вспомогательная) — через конденсатор.

В отличие от однофазных двигателей с пусковыми элементами в конденсаторных двигателях вспомогательная обмотка остается подключенной к сети как при пуске в ход, так и при работе. Конденсаторный двигатель, по существу, является двухфазным, хотя и питается от однофазной сети.

Магнитное поле в конденсаторном двигателе создается двумя обмотками, токи которых вследствие включения конденсатора сдвинуты по фазе. В общем случае магнитное поле конденсаторного двигателя — эллиптическое, а при определенных условиях — круговое.

Известно [2], что круговое вращающееся поле в машине с двумя обмотками получается в том случае, когда МДС обмоток равны $F_A = F_B$ и сдвинуты во времени на угол β, дополняющий угол пространственного сдвига Θ до 180°: $(\Theta + \beta) = 180°$.

Суммарная МДС F кругового поля максимальна при угле $\Theta = 90°$. Именно поэтому для получения максимального кругового вращающегося поля при минимальных МДС фаз обмотки в двухфазных двигателях обычно смещают на 90°. В этом случае угол временного сдвига токов в фазах должен быть равен пространственному углу ($\Theta = \beta = 90°$), а МДС фаз должны быть равны: $F_A = F_B$. Если хотя бы одно из этих условий выполняется неточно, то поле получается не круговым, а эллиптическим.

Любое эллиптическое поле может быть разложено на два поля — прямое и обратное, которые вращаются в противоположные стороны. Обратновращающееся поле двигателя создает момент, направленный навстречу основному моменту машины — моменту от прямовращающегося поля. Оно увеличивает токи, потери в двигателе, уменьшает его КПД. Поэтому обычно стремятся не к эллиптическому, а к круговому вращающемуся полю.

Практически круговое вращающееся поле в конденсаторном двигателе можно получить одним из трех способов:

1) правильным выбором коэффициента трансформации (отношения эффективных чисел витков вспомогательной и главной обмоток $k = w_B/w_A$) и емкости конденсатора C_k (мкФ) при заданном напряжении сети U (В) (рис. 5.21):

$$k = \operatorname{tg} \varphi_A;\ C_k = 10^6/(2\pi f x_C) = 10^6 \cos^2 \varphi_A/(2\pi f x_A) = \\ = 10^6 I_A \cos \varphi_A/(2\pi f k U_A); \quad (5.21)$$

2) правильным выбором напряжений на фазах (точнее, их отношения $\alpha = U_A/U_B$) и емкости конденсатора C_α (мкФ) при заданном коэффициенте трансформации $k \neq \operatorname{tg} \varphi_A$ (рис. 5.22):

$$\left.\begin{aligned} &\alpha = \operatorname{tg} \varphi_A/k;\ U_B = kU_A/\operatorname{tg} \varphi_A; \\ &C_\alpha = 10^6/(2\pi f x_C) = 10^6 \alpha^2 \cos^2 \varphi_A/(2\pi f x_A) = \\ &= 10^6 I_A \sin \varphi_A/(2\pi f k^2 U_A); \end{aligned}\right\} \quad (5.22)$$

3) включением последовательно с емкостью добавочного сопротивления $R_{доб}$ (Ом) и правильным выбором емкости конденсатора

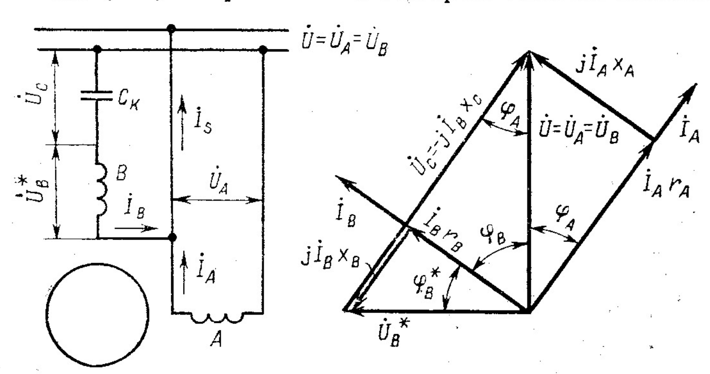


Рис. 5.21. Принципиальная схема включения и векторная диаграмма конденсаторного двигателя при круговом поле, полученном с помощью выбора коэффициента трансформации k и емкости конденсатора C_k

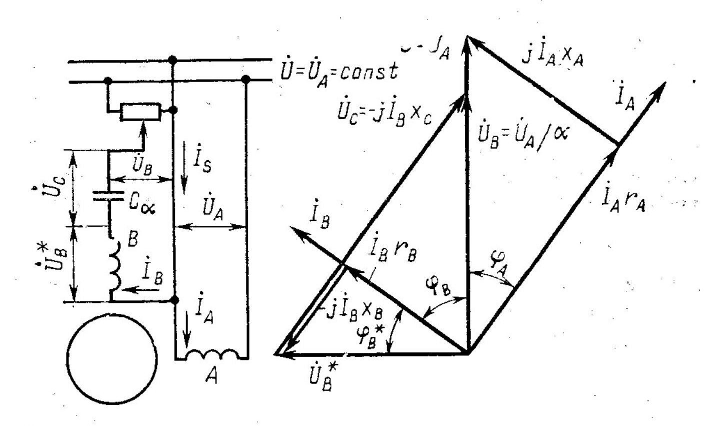


Рис. 5.22. Принципиальная схема включения и векторная диаграмма конденсаторного двигателя при круговом поле, полученном изменением напряжения на одной из фаз $\alpha = U_A/U_B$ и емкости конденсатора C_α

C_R (мкФ) при заданных напряжении сети U (В) и коэффициенте трансформации $k < \operatorname{tg} \varphi_A$ (рис. 5.23):

$$\left.\begin{aligned} R_{доб} &= kx_A - k^2 r_A = kU_A \cos\varphi_A (\operatorname{tg}\varphi_A - k)/I_A; \\ C_R &= 10^6/(2\pi f x_C) = 10^6/[2\pi f (kr_A + k^2 x_A)] = \\ &= 10^6 I_A/[2\pi f kU_A \cos\varphi_A (k \operatorname{tg}\varphi_A + 1)]. \end{aligned}\right\} \quad (5.23)$$

В приведенных выше выражениях: φ_A — угол сдвига между током I_A и напряжением фазы U_A при круговом поле; r_A, x_A — соответственно активное и индуктивное сопротивления машины, приведенные к числу витков фазы A при круговом поле.

Из (5.21) — (5.23) следует, что при заданных k, α и $R_{доб}$ (соответственно первый, второй и третий способы) независимо от емкости конденсатора круговое вращающееся поле можно получить только для определенного режима работы двигателя (для одной частоты вращения). Действительно, при изменении режима работы (частоты вращения) у любого двигателя меняется $\cos\varphi_A$ и, следо-

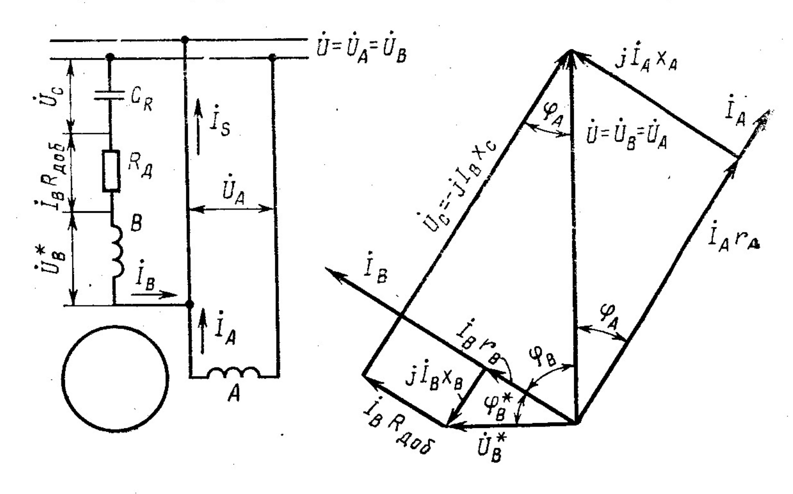


Рис. 5.23. Принципиальная схема включения и векторная диаграмма конденсаторного двигателя при круговом поле, полученном с помощью добавочного сопротивления $R_{доб}$ и емкости C_R конденсатора

вательно, φ_A, r_A, x_A, I_A. Это значит, что для получения кругового поля в различных режимах вместе с емкостью конденсатора C нужно непрерывно менять или k, или α, или $R_{доб}$, что практически выполнить невозможно.

Для получения наилучших рабочих свойств конденсаторные двигатели обычно рассчитываются так, чтобы круговое вращающееся поле получалось при номинальном режиме или при режиме, близком к нему. Это обеспечивает высокие энергетические показатели двигателя при работе, однако не позволяет получить достаточный пусковой момент — он обычно не превосходит 30—40% от номинального.

Для увеличения пускового момента в этих двигателях параллельно с основной (рабочей) емкостью часто включают еще пусковую емкость, которую отключают сразу же после пуска двигателя в ход (см. § 5.1). Пусковая емкость приводит к значительному возрастанию магнитного потока вспомогательной фазы при пуске, а следовательно, и вращающего момента. Необходимость отключения пусковой емкости $C_п$ при работе обусловливается тем, что она, хотя и увеличивает вращающий момент (за счет форсирования потока Φ_B), делает поле эллиптическим в рабочем режиме и тем самым значительно уменьшает КПД двигателя.

При работе с конденсаторным двигателем необходимо знать, что напряжение на конденсаторе при круговом вращающемся поле больше напряжения на его фазах и напряжения сети. Так, для первого способа, как это видно из векторной диаграммы, помещенной на рис. 5.21,

$$U_C = U\sqrt{1+k^2}.$$

Для расчета величин k, a, $R_{доб}$ и C, удовлетворяющих круговому вращающемуся полю в конденсаторном двигателе, необходимо знать величины φ_A, r_A, x_A (или φ_A, I_A, U_A) двигателя при круговом поле, которые можно найти либо путем расчета при известной геометрии статора и ротора и известных обмоточных данных, либо экспериментально. Второй путь значительно проще.

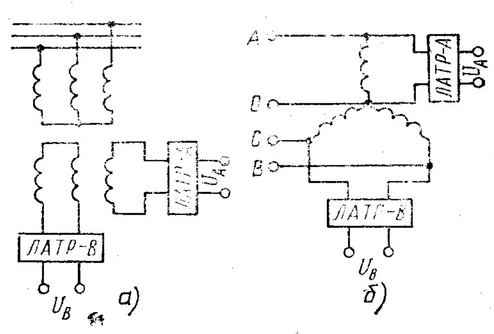


Рис. 5.24. Схемы для преобразования трехфазной сети в симметричную двухфазную

Чтобы определить параметры главной обмотки A при неподвижном роторе, на нее нужно подать напряжение U_A, при котором будет работать конденсаторный двигатель, и измерить потребляемый ток I_A и мощность P_A. По полученным данным просто рассчитать искомые параметры:

$$Z_A = U_A/I_A;\quad \cos\varphi_A = P_A/(U_A I_A);$$

$$r_A = P_A/I_A^2 = Z_A\cos\varphi_A;\quad x_A = \sqrt{Z_A^2 - r_A^2} = Z_A \sin_A\varphi_A.$$

Аналогично можно определить и параметры вспомогательной обмотки B.

Параметры обмоток двигателя при вращении ротора определять несколько сложнее. Для этого необходимо провести испытания двигателя при круговом вращающемся поле и его питании от сети, напряжения фаз которой сдвинуты во времени на 1/4 периода. Такую сеть можно получить либо непосредственно из трехфазной сети, если она имеет нулевой провод (рис. 5.24, *б*), либо с помощью трехфазного трансформатора при его включении по схеме, изображенной на рис. 5.24, *а*, либо с помощью фазовращателя.

Чтобы определить параметры обмоток двигателя, на них (при отключенном конденсаторе) нужно подать напряжения U_A и U_B, прямо пропорциональные эффективному числу витков соответствующих обмоток $U_B/U_A = k$. Напряжение U_A должно быть равно тому напряжению, которое будет подаваться на фазу A при конденсаторном питании двигателя, а напряжение $U_B = kU_A$. При таком симметричном питании необходимо определить токи I_A, I_B и мощ-

ности P_A, P_B при тех скольжениях, для которых желательно получение кругового вращающегося поля при конденсаторном питании двигателя. По найденным таким образом опытным данным с помощью приведенных формул можно рассчитать параметры обмоток и $\cos\varphi_A$ для требуемого скольжения.

В том случае, когда коэффициент трансформации неизвестен, его можно определить экспериментально, проведя два опыта холостого хода при однофазном питании.

Цель работы — ознакомление с конструкцией, принципом действия и основными характеристиками конденсаторных двигателей при различных схемах включения.

ПРОГРАММА РАБОТЫ

А. Экспериментальные исследования

1. Ознакомиться с конструкцией двигателя и его паспортными данными.
2. Определить коэффициент трансформации двигателя.
3. Исследовать работу двигателя при однофазном питании — снять рабочие характеристики n, P_A, I_A, P_R, η, $\cos\varphi_A$ в зависимости от M при $U_A=U_{A\text{н}}=\text{const}$.
4. Исследовать работу двигателя при симметричном двухфазном питании — снять рабочие характеристики n, I_A, I_B, I_S, P_A, P_B, P_S, P_R, $\cos\varphi_A$, $\cos\varphi_B$, $\cos\varphi$, η в зависимости от M при $U_A=U_{A\text{н}}=\text{const}$ и $\dot{U}_B=jk\dot{U}_{A\text{н}}=\text{const}$.
5. Исследовать работу двигателя с емкостью конденсатора C_k:

а) получить круговое вращающееся поле при частоте вращения, для которой $\text{tg}\,\varphi_A=k$;

б) снять рабочие характеристики конденсаторного двигателя n, I_A, I_B, I_S, P_A, P_B, P_S, P_R, $\cos\varphi_A$, $\cos\varphi_B$, η в зависимости от M при $U_A=U_{A\text{н}}=\text{const}$, $C=C_k$.

6. Исследовать работу конденсаторного двигателя с емкостью конденсатора C_α:

а) получить круговое вращающееся поле путем изменения напряжения U_B (при постоянном напряжении U_A) и емкости конденсатора C_α для скольжения $s=0{,}1$ (или иного скольжения);

б) снять рабочие характеристики двигателя n, I_A, I_B, I_S, P_A, P_B, P_S, P_R, $\cos\varphi_A$, η в зависимости от M при $U_A=U_{A\text{н}}=\text{const}$; $U_B=U_{B\,\text{расч}}=\text{const}$.

7. Исследовать работу двигателя с емкостью конденсатора C_R и добавочным сопротивлением $R_{\text{доб}}$:

а) получить круговое вращающееся поле с помощью добавочного сопротивления $R_{\text{доб}}$ и емкости конденсатора C_R при скольжении $s=0{,}1$ (или ином скольжении);

б) снять рабочие характеристики двигателя при значениях $R_{\text{доб}}$ и C_R, обеспечивающих круговое вращающееся поле при заданном скольжении: n, I_A, I_B, I_S, P_A, P_B, P_S, $\cos\varphi$, η в зависимости от M при $U_A=U_B=U_{A\text{н}}=\text{const}$.

Б. Расчеты и построения

1. Рассчитать коэффициент трансформации двигателя.

2. Построить на отдельных графиках зависимости $M=f(n)$; $P_R=f(M)$; $P_S=f(M)$; $\eta=f(M)$; $\cos\varphi=f(M)$; $I_S=f(M)$: а) при однофазном питании; б) при симметричном двухфазном питании; в) при конденсаторном питании (согласно п. 5, 6, 7 программы).

3. Построить три векторные диаграммы двигателя при конденсаторном сдвиге фаз для скольжений, при которых имеет место круговое вращающееся поле (согласно п. 5, 6, 7 программы).

4. Сравнить пусковые моменты и токи для всех исследованных режимов работы двигателя.

ПОЯСНЕНИЯ И УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

Прежде чем приступить к исследованиям, необходимо познакомиться с устройством двигателя и его паспортными данными. Далее собирается схема, представленная на рис. 5.25. Питание двигателя осуществляется либо от симметричной двухфазной сети, либо от однофазной сети через два лабораторных автотрансформатора (*ЛАТР—А* и *ЛАТР—В*). Мощность, потребляемая фазами *А* и *В* двигателя, измеряется одним ваттметром с помощью ваттметрового переключателя $П_2$. Частота вращения измеряется тахометром или строботахометром. Момент на валу двигателя создается и измеряется электромагнитным тормозом.

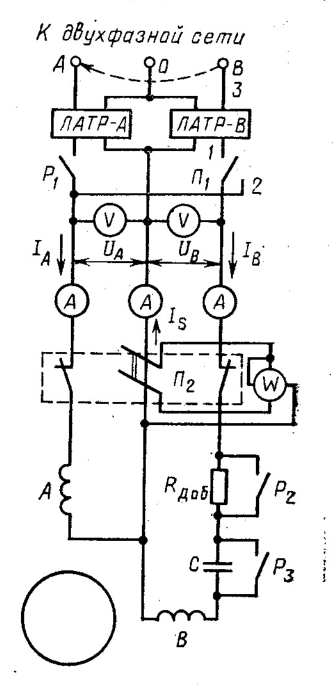


Рис. 5.25. Основная схема соединений для проведения экспериментальных исследований

Определение коэффициента трансформации. Коэффициент трансформации двигателя $k=w_B/w_A$ определяется путем проведения двух опытов холостого хода при однофазном питании двигателя. Вначале обмотку *А* питают напряжением $U_A=U_{Aн}$ при отключенной от сети обмотке *В* и измеряют ЭДС E_B обмотки *В*. Затем питают обмотку *В* напряжением $U_B\approx1{,}2E_B$ и измеряют ЭДС E_A обмотки *А* *. Коэффициент трансформации определяется из выражения

$$k=\sqrt{U_BE_B/(U_AE_A)}.$$

Для проведения опыта используется основная схема (рис. 5.25). При пуске двигатель питается от двухфазной сети (переключатель $П_1$

* Предполагается, что падение напряжений на собственном сопротивлении обмотки *В* составляет примерно 20%.

находится в положении *1*, рубильники P_1, P_2 и P_3 замкнуты), напряжение $U_A = U_{Aн}$, напряжение $U_B \approx U_A$. По окончании пуска переключатель $П_1$ ставится в нейтральное положение (питание с фазы *B* снимается); проверяется напряжение на фазе *A* ($U_A = U_{Aн}$) и измеряется ЭДС E_B фазы *B*. Затем переключатель $П_1$ переводится в положение *1* (фаза *B* подключается к сети), *ЛАТРом—B* устанавливается напряжение $U_B = 1{,}2\,U_A$, рубильником P_1 снимается питание с фазы *A* и измеряется ЭДС E_A фазы *A*.

Полученный опытным путем коэффициент трансформации необходимо сравнить с действительным, если он известен.

Исследование двигателя в однофазном режиме. Для получения рабочих характеристик двигателя в этом режиме используется основная схема (рис. 5.25). Двигатель пускается в ход при двухфазном питании. Затем фаза *B* отключается. После пуска двигатель нагружается с помощью тормоза. Целесообразно предварительно определить максимальный момент, развиваемый двигателем в однофазном режиме. Это позволит производить измерения исследуемых величин через равные промежутки в диапазоне от $M = 0$ до $M = M_m$ (всего 5—6 точек).

Во время эксперимента напряжение на фазе *A* должно поддерживаться постоянным. Расчетные величины определяются по формулам $P_R = 1{,}05\ Mn$; $\cos\varphi_A = P_A/(U_A I_A)$; $\eta = P_R/P_A$.

Исследование двигателя при симметричном двухфазном питании. Для проведения эксперимента используется основная схема (рубильники P_1, P_2, P_3 замкнуты, переключатель $П_1$ находится в положении *1*). Напряжение $U_A = U_{Aн}$ устанавливается *ЛАТРом—A;* напряжение $U_B = kU_A$ — *ЛАТРом—B*.

Во время эксперимента напряжение на фазе *A* поддерживается постоянным. Напряжение U_B может несколько регулироваться, с тем чтобы отношение токов I_A и I_B было равно *k*, а мощности P_A и P_B были примерно равны. При этом магнитные потоки обмоток будут одинаковы, а следовательно, поле двигателя — круговым.

Рабочие характеристики двигателя *n*, I_A, I_B, I_S, P_A, P_B, P_S, P_R, η, $\cos\varphi_A$, $\cos\varphi_B$, $\operatorname{tg}\varphi_A$ в зависимости от *M* снимаются в диапазоне от $M = 0$ до M_m. Всего снимается 6—7 точек. Необходимо, чтобы среди измерений была точка, соответствующая скольжению $s = 0{,}1$ или иному скольжению, для которого в последующем будет получаться круговое поле.

После снятия рабочих характеристик проводится опыт короткого замыкания (при $n = 0$), в процессе которого снимаются показания тормоза и всех приборов. Опыт короткого замыкания необходимо проводить быстро во избежание перегрева обмоток двигателя.

Для точки, в которой $\operatorname{tg}\varphi_A = k$, по формуле (5.21) рассчитывается емкость конденсатора C_k, необходимого для получения кругового вращающегося поля.

Исследование конденсаторного двигателя с емкостью конденсатора C_k. Для исследования используется основная схема. Рубильники P_1, P_2 замкнуты, рубильник P_3 разомкнут, переключатель $П_1$

находится в положении 2. Емкость конденсатора определяется из предыдущего опыта. На двигатель подается напряжение $U_A = U_{Aн}$, которое во время всего опыта поддерживается постоянным.

Прежде чем приступить к снятию рабочих характеристик, необходимо проверить правильность расчетов, произведенных по данным предыдущего опыта, для чего с помощью тормоза устанавливается частота вращения, при которой в предыдущем опыте $\operatorname{tg}\varphi_A = k$. Если расчеты были произведены правильно, то при этой частоте вращения должно быть круговое вращающееся поле. О его наличии можно судить либо по токам $I_A = kI_B$, $I_A^2 + I_B^2 = I_S^2$, либо по мощностям $P_A \approx P_B$, либо по напряжениям ($U_A = U_B^*/k$, $U_C = \sqrt{U_A^2 + U_B^{*2}} = U_A\sqrt{1+k^2}$, где U_B^* — напряжение непосредственно на фазе B (после конденсатора); U_C — напряжение на конденсаторе.

Если предыдущие равенства выполняются не совсем точно, то можно несколько изменить емкость конденсатора (в ту или иную сторону) или незначительно изменить частоту вращения.

Если погрешность в равенствах не превосходит 5—10%, то следует снять показания всех приборов схемы (U_A, U_B^*, U_C, I_A, I_B, I_S, P_A, P_B) и по ним построить векторную диаграмму конденсаторного двигателя при круговом поле. Необходимые для построения векторной диаграммы величины определяются по следующим формулам:

$$\left.\begin{aligned}&\cos\varphi_A = P_A/(U_A I_A);\ \cos\varphi_B = P_B/(U_A I_B);\ r_A = U_A\cos\varphi_A/I_A;\\&r_B = U_A\cos\varphi_B/I_B;\ x_A = U_A\sin\varphi_A/I_A;\\&x_B^* = x_C - r_B\operatorname{tg}\varphi_B;\ x_C = U_C/I_B = 10^6/(2\pi f C_k).\end{aligned}\right\}\quad(5.24)$$

Здесь x_B^* — полное индуктивное сопротивление двигателя, приведенное к числу витков фазы B (без конденсатора).

Рабочие характеристики конденсаторного двигателя (5—7 точек) снимаются обычным порядком — в диапазоне от $M=0$ до $M=M_m$ примерно через равные интервалы по моменту. Снятие рабочих характеристик следует заканчивать опытом короткого замыкания (при $n=0$).

Исследование конденсаторного двигателя с емкостью конденсатора C_α. Круговое вращающееся поле в конденсаторном двигателе для частот вращения, при которых $\operatorname{tg}\varphi_A \neq k$, можно получить изменением напряжения на одной из фаз $\alpha = U_A/U_B$ и емкости конденсатора C_α.

В данной работе круговое вращающееся поле образуется изменением напряжения U_B, подводимого к фазе B, и емкости конденсатора C_α. Для расчета напряжения U_B и емкости конденсатора C_α используются данные экспериментального исследования двигателя при симметричном двухфазном питании и скольжении $s=0{,}1$. Расчет выполняется по формулам (5.22).

Для эксперимента используется основная схема, переключатель $П_1$ которой находится в положении 1, рубильники P_1, P_2 замкнуты,

рубильник P_3 разомкнут, подводящий провод 3 переключен с вывода B на вывод A (см. штриховую линию).

Для получения кругового вращающегося поля при заданном скольжении на фазу A подается номинальное напряжение, на фазу B (вместе с конденсатором C_α) — расчетное напряжение U_B. Необходимое скольжение устанавливается тормозом.

Если расчеты были произведены правильно, то при заданном скольжении (частоте вращения) поле должно быть круговым. Его можно проверить либо по токам, либо по мощностям (см. предыдущий опыт).

После получения кругового вращающегося поля при заданной частоте вращения необходимо записать показания всех приборов схемы, а также напряжения $U_B{}^*$ и U_C. По этим данным можно построить векторную диаграмму конденсаторого двигателя. Необходимые для построения величины рассчитываются по формулам (5.24).

Рабочие характеристики конденсаторного двигателя при данных U_A, U_B и C_α снимаются так же, как и в предыдущих опытах.

Исследование конденсаторного двигателя с добавочным сопротивлением $R_{доб}$ и емкостью конденсатора C_R. Круговое вращающееся поле в конденсаторном двигателе для частот вращения, при которых $\operatorname{tg}\varphi_A > k$, можно получить включением в фазу B последовательно с конденсатором определенного добавочного сопротивления $R_{доб}$ и выбором соответствующей емкости конденсатора C_R.

Добавочное сопротивление $R_{доб}$ и емкость конденсатора C_R рассчитывают по формулам (5.23), используя данные исследований при симметричном питании. Частота вращения, при которой необходимо создать круговое вращающееся поле, должна соответствовать режиму, в котором $\operatorname{tg}\varphi_A > k$.

Для эксперимента используется схема предыдущего опыта (переключатель Π_1 находится в положении 2, рубильники P_2, P_3 разомкнуты, рубильник P_1 замкнут). С помощью *ЛАТРа—А* устанавливается и поддерживается во время всего опыта напряжение $U_A = U_{Aн}$. В фазу B включаются полученные в результате расчета $R_{доб}$ и C_R. Тормозом устанавливается заданная частота вращения, для которой рассчитывались $R_{доб}$ и C_R.

После получения кругового вращающегося поля необходимо записать данные всех приборов схемы, измерить $U_B{}^*$, U_C и рассчитать потери в добавочном сопротивлении $I_B{}^2 R_{доб}$. По этим данным можно построить векторную диаграмму конденсаторного двигателя при круговом поле, аналогичную представленной на рис. 5.23. Необходимые для построения диаграммы данные можно рассчитать по формулам (5.24).

Рабочие характеристики конденсаторного двигателя (включая опыт короткого замыкания) при данных U_A, $R_{доб}$ и C_R снимаются так же, как и в предыдущих опытах.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Из сравнения рабочих характеристик двигателя при однофазном и симметричном двухфазном питании видно, что вращающий момент M, а следовательно, и развиваемая двигателем механическая мощность P_B при однофазном питании примерно в два раза меньше, чем при симметричном двухфазном питании. Это объясняется тем, что магнитное поле статора при однофазном питании не вращающееся, а пульсирующее. Двигательный момент создается лишь прямовращающимся магнитным полем, которое значительно меньше кругового поля при симметричном питании. Кроме прямовращающегося в машине существует обратновращающееся поле, которое создает тормозящий момент. Наличие обратновращающегося поля приводит к значительному снижению механической мощности P_B и энергетических показателей η и $\cos\varphi$ двигателя. При однофазном питании пусковой момент $M_к=0$.

Из сравнения рабочих характеристик при двухфазном симметричном питании и конденсаторном сдвиге фаз видно, что они значительно отличаются. Вид рабочих характеристик конденсаторного двигателя зависит от способа создания кругового вращающегося поля.

Механическая мощность, развиваемая двигателем, и токи обмоток при его симметричном питании равны соответственно мощностям и токам двигателя при конденсаторном сдвиге фаз только при тех скольжениях s_0 (частотах вращения n_0), при которых обеспечено круговое вращающееся поле. При всех остальных скольжениях они отличаются в большей или меньшей степени в зависимости от параметров двигателя — соотношения его активных и индуктивных сопротивлений, а также от схемы включения двигателя в однофазную сеть.

Токи обмоток двигателя при конденсаторном сдвиге фаз в режимах, когда поле некруговое, обычно больше соответствующих токов двигателя с симметричным питанием. Это объясняется наличием обратновращающегося поля, которое всегда вызывает увеличение токов и ухудшение характеристик двигателя.

С изменением нагрузки (частоты вращения) двигателя при симметричном питании и конденсаторном сдвиге фаз особенно сильно отличаются по значению токи обмотки B, последовательно с которой включается конденсатор. Объясняется это тем, что напряжение $\dot{U}_B{}^*$, приходящееся непосредственно на обмотку B, при симметричном питании остается неизменным для любого скольжения, а у конденсаторного двигателя изменяется значительно: оно равно постоянному значению напряжения сети $\dot{U}_1$ минус падение напряжения на конденсаторе, а у двигателя, включаемого по схеме, приведенной на рис. 5.23, еще и минус падение напряжения на дополнительном сопротивлении: $\dot{U}_B{}^*=\dot{U}_1-\dot{I}_B(R_{доб}-jx_C)$. Напряжение $\dot{U}_B{}^*$ в конденсаторном двигателе во многих режимах значительно превосходит напряжение двигателя при симметричном питании.

Ток холостого хода двигателя при конденсаторном сдвиге фаз обычно больше, чем при симметричном питании. Если скольжение, при котором обеспечивается круговое вращающееся поле, велико ($s_0=0,3\div0,5$), то ток холостого хода в конденсаторном двигателе соизмерим с током к. з. Последнее объясняется тем, что при холостом ходе значительно возрастает напряжение U_B^* непосредственно на обмотке B.

Пусковой момент $M_к$ конденсаторного двигателя равен пусковому моменту двигателя при симметричном питании только в том случае, когда в конденсаторном двигателе круговое поле получено при пуске ($s_0=1$). Чем меньше скольжение s_0, при котором в конденсаторном двигателе обеспечивается круговое поле, тем меньше пусковой момент. При $s_0=s_н$ у большинства конденсаторных двигателей кратность пускового момента не превышает 0,2—0,4.

У конденсаторного двигателя при всех скольжениях, кроме $s=s_0$, КПД обычно меньше, чем у двигателя при симметричном питании. Объясняется это, во-первых, тем, что у двигателя при симметричном питании магнитное поле круговое при всех скольжениях (частотах вращения), а у конденсаторного — круговое только при $s=s_0$; при других скольжениях поле эллиптическое, состоящее из прямого поля, создающего полезный вращающий момент, и обратного поля, создающего тормозной момент; во-вторых, тем, что напряжение U_B^* на обмотке B в конденсаторном двигателе нередко значительно превосходит напряжение U_B при симметричном питании. У двигателя с активным сопротивлением КПД меньше, чем при симметричном питании и при $s=s_0$ (за счет потерь в дополнительном сопротивлении).

Коэффициент мощности $\cos\varphi$ конденсаторного двигателя, как правило, выше, чем коэффициент мощности двигателя при симметричном питании, что объясняется наличием в цепи обмотки B конденсатора.

Вопросы для самопроверки

1. Каковы условия получения кругового вращающегося поля в машине с двумя обмотками, сдвинутыми в пространстве на произвольный угол?
2. При каком угле пространственного сдвига Θ обмоток в двухфазной машине получается максимальное круговое поле?
3. Какими способами можно получить круговое вращающееся поле в конденсаторном двигателе с двумя обмотками?
4. Возможно ли, изменяя только емкость конденсатора, получить круговое поле в конденсаторном двигателе при различных угловых скоростях?
5. Какое влияние на работу двигателя оказывает обратновращающееся магнитное поле?
6. Чем определяется напряжение на конденсаторе в конденсаторном двигателе?
7. Каким образом можно получить симметричную двухфазную систему напряжений при наличии только трехфазной сети?
8. Каким образом можно определить параметры фазы A двухфазного двигателя (r_A, x_A, $\cos\varphi_A$), соответствующие круговому вращающемуся полю: а) при $n=0$; б) при $n\neq0$?
9. Каким образом может быть экспериментально определен коэффициент трансформации двухфазного асинхронного двигателя?

10. За счет чего увеличивается пусковой момент конденсаторного двигателя при включении конденсатора, емкость которого превосходит емкость, обеспечивающую круговое вращающееся поле в номинальном режиме?

11. В каких случаях невозможно получить круговое поле в конденсаторном двигателе с двумя обмотками с помощью дополнительного сопротивления $R_{доб}$ и емкости конденсатора $C_{н}$?

Глава 6

ИСПЫТАНИЕ СИНХРОННЫХ МИКРОДВИГАТЕЛЕЙ

§ 6.1. СИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

В системах автоматического управления, звуко- и видеозаписи, фототелеграфии и связи, где требуется обеспечить синхронную работу механизмов и постоянство частоты вращения отдельных элементов системы при изменении нагрузки и напряжения питания, широко применяются синхронные двигатели малой мощности. До недавнего времени в качестве таких двигателей использовались в основном синхронные реактивные и гистерезисные двигатели. В последние годы в связи с разработками новых магнитотвердых материалов с большой удельной магнитной энергией были созданы синхронные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов, способные успешно конкурировать по массовым и энергетическим показателям с синхронными двигателями других типов [7].

Синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) обладают такими положительными качествами, как высокая надежность, сравнительная простота конструкции, отсутствие скользящих контактов, высокие энергетические показатели и перегрузочная способность, устойчивость работы в электроприводах синфазного вращения и стабильность частоты вращения. К их недостаткам относятся большая кратность пускового тока, более высокая стоимость по сравнению с реактивными и частично гистерезисными двигателями, значительное снижение момента входа в синхронизм с увеличением момента инерции нагрузки, наличие тормозного (генераторного) момента в процессе пуска двигателя.

Конструктивно синхронные двигатели с постоянными магнитами сочетают в себе элементы синхронных машин — систему возбуждения (постоянные магниты) — и элементы асинхронных машин — короткозамкнутую обмотку, выполненную в виде беличьей клетки. Взаимное расположение постоянных магнитов и короткозамкнутой обмотки на роторе может быть либо радиальным (рис. 6.1), либо аксиальным (рис. 6. 2). Статоры в обеих конструкциях ничем не отличаются от статоров обычных асинхронных машин.

Конструктивной особенностью двигателя с радиальным расположением постоянных магнитов и короткозамкнутой обмотки является выполнение полюсной системы ротора с очень малым зазором между соседними полюсными башмаками (рис. 6.1, *а*). Значи-

Тормозной момент

$$M_{\text{то}} = -\frac{m_1 U^2 r_S}{\Omega_c \left(r_S^2 + x_d x_q\right)^2} \left[\varepsilon^2 \left(r_S^2 + x_q^2\right) + 0{,}5 \left(x_d - x_q\right)^2\right]. \qquad (6.4)$$

Углы смещения

$$\operatorname{tg} \alpha_\varepsilon = \frac{r_S \left(2x_q^2 + r_S^2 - x_d x_q\right)}{x_d x_q^2 - r_S^2 x_q + 2 r_S^2 x_d}; \quad \operatorname{tg} 2\alpha_{dq} = \frac{r_S \left(x_d + x_q\right)}{x_d x_q - r_S^2}. \qquad (6.5)$$

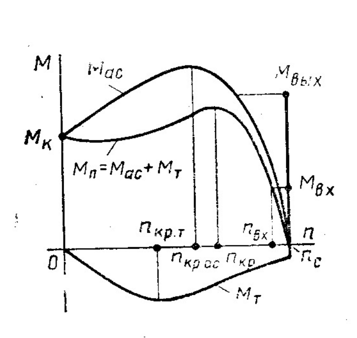


Рис. 6.3. Механические характеристики синхронного двигателя с постоянными магнитами в асинхронном режиме

Рис. 6.4. Угловые характеристики синхронного двигателя с постоянными магнитами

В формулах (6.1) — (6.5) θ_U — угол нагрузки, угол между векторами питающего напряжения $\dot{U}$ и ЭДС холостого хода $-\dot{E}_0$; $\varepsilon = E_0/U$ — степень возбужденности двигателя; $\Omega_c = 2\pi f/p$ — механическая синхронная угловая скорость ротора; p — число пар полюсов.

Из приведенных выражений и представленных на рис. 6.4 угловых характеристик видно, как значительно влияет активное сопротивление обмотки якоря r_S в двигателях малой мощности. При пренебрежении активным сопротивлением r_S не только вносятся заметные погрешности в определение амплитуд основного и реактивного моментов, но остаются не учтенными тормозной момент и углы смещения.

В синхронных двигателях с радиальным расположением постоянных магнитов и короткозамкнутой обмотки ротора индуктивное сопротивление обмотки якоря по поперечной оси превышает индуктивное сопротивление по продольной оси ($x_q > x_d$), поскольку магнитная проницаемость магнитов значительно меньше магнитной проницаемости электротехнической стали. В связи с этим реактивная составляющая электромагнитного момента в синхронном режиме такого двигателя по сравнению с реактивной составляющей обычного синхронного двигателя, имеющего электромагнитное возбуждение, изменяет знак на обратный. Вследствие изменения знака

реактивной составляющей электромагнитного момента максимум угловой характеристики смещается в сторону бо́льших значений углов нагрузки θ_U (рис. 6.4). При значительной разности индуктивных сопротивлений обмоток якоря по продольной и поперечной осям и малой степени возбужденности двигателя реактивный момент может настолько приблизиться к основному моменту, что результирующая угловая характеристика $M_c = f(\theta_U)$ в зоне малых значений углов нагрузки может оказаться в области отрицательных значений момента (в области генераторного режима). При этом двигатель теряет свойство синфазности.

В двигателях с аксиальным расположением постоянных магнитов и короткозамкнутой обмотки ротора индуктивные сопротивления обмотки якоря по осям d и q равны $x_d = x_S + x_{ad\text{м}} + x_m$; $x_q = x_S + x_{aq\text{м}} + x_m$, где x_S — индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора; $x_{ad\text{м}}$, $x_{aq\text{м}}$ — индуктивные сопротивления, обусловленные потоком якоря в зоне магнитов; x_m — индуктивное сопротивление, обусловленное потоком в зоне короткозамкнутого ротора. Вследствие малой магнитной проницаемости магнитов $x_m \gg x_{ad\text{м}}$ и $x_m \gg x_{aq\text{м}}$. Поэтому такой двигатель может рассматриваться как неявнополюсный ($x_d \approx x_q$).

Синхронизирующие свойства синхронных двигателей характеризуются в основном моментом входа в синхронизм $M_{\text{вх}}$ — максимальным моментом сопротивления нагрузки, при котором двигатель еще втягивается в синхронизм. Момент входа зависит от крутизны пусковой механической характеристики $M_\text{п}'$ в зоне малых скольжений и от момента выхода из синхронизма $M_{\text{вых}}$. Момент выхода характеризует собой перегрузочную способность двигателя и определяется максимальным моментом сопротивления нагрузки, при котором двигатель выпадает из синхронизма.

Цель работы — изучение пусковых, рабочих и синхронизирующих свойств синхронных двигателей с постоянными магнитами. В качестве объекта исследования может использоваться любой трехфазный синхронный двигатель с постоянными магнитами малой мощности.

ПРОГРАММА РАБОТЫ

А. Экспериментальные исследования

1. Ознакомиться с конструкцией двигателя и его паспортными данными.

2. Исследовать пусковые свойства двигателя: а) измерить начальные пусковые моменты $M_\text{к}$ и ток $I_{S\text{к}}$ при $U = U_\text{н}$; б) снять результирующую механическую характеристику двигателя в асинхронном режиме $M_\text{п} = f(n)$ при $U = U_\text{н}$ в диапазоне частот вращения $n_{\text{кр}} < n < n_{\text{вх}}$; в) снять зависимость тока статора в тормозном (генераторном) режиме от частоты вращения ротора $I_{S\text{т}} = f(n)$ при $U = 0$.

3. Исследовать рабочие свойства двигателя: а) измерить значение ЭДС E_0, наводимой полем постоянных магнитов в обмотке

статора при синхронной частоте вращения ротора ($n=n_c$); б) снять рабочие характеристики двигателя I_S, P_S, P_R, $\cos\varphi$, η в зависимости от M при $U=U_н$; в) снять угловую характеристику двигателя $M_c=f(\theta_U')$ при $U=U_н$.

4. Исследовать синхронизирующие свойства двигателя: а) определить моменты входа в синхронизм $M_{вх}$ и выхода из синхронизма $M_{вых}$ при $U=U_н$ и 0,85 $U_н$; б) определить моменты входа в синхронизм для двух различных моментов инерции нагрузки ($J_{нагр}'\approx 2J_R$; $J_{нагр}''\approx 5J_R$).

Б. Расчеты и построения

1. Рассчитать механическую характеристику двигателя в тормозном (генераторном) режиме: $M_т=f(n)$.

2. Построить на одном графике механические характеристики двигателя в асинхронном режиме $M_п$, $M_т$, $M_{ас}$ в зависимости от n и определить крутизну пусковой механической характеристики $M_п'$.

3. Построить рабочие характеристики двигателя I_S, P_S, P_R, $\cos\varphi$, η в зависимости от M и сравнить экспериментальные данные при $M=M_н$ с паспортными данными двигателя.

4. Построить угловую характеристику двигателя $M_c=f(\theta_U')$ и определить удельный синхронизирующий момент.

5. Рассчитать кратности моментов (начального пускового, выхода из синхронизма и входа в синхронизм) и кратность пускового тока по отношению к номинальным данным: $k_п=M_к/M_н$; $k_M=M_{вых}/M_н$; $k_{вх}=M_{вх}/M_н$; $k_i=I_{Sк}/I_н$.

6. Определить степень возбужденности двигателя $\varepsilon=E_0/U$.

7. Используя опытные данные и выражение (6.7), рассчитать и построить зависимость момента входа от момента инерции.

ПОЯСНЕНИЯ И УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

Перед началом работы следует ознакомиться с конструкцией и паспортными данными двигателя и рассчитать номинальный момент (Н·м): $M_н=9{,}55\ P_{Rн}/n_c$, где $P_{Rн}$ — номинальная полезная мощность двигателя, Вт; n_c — синхронная частота вращения, об/мин. Программа экспериментальных исследований, кроме п. 2в и 3а, выполнять которые рекомендуется в конце испытаний, проводится по схеме, приведенной на рис. 6.5. Питание двигателя осуществляется от трехфазной сети через индукционный регулятор или трансформатор типа РНТ. Момент на валу двигателя создается и измеряется с помощью ленточного (нитяного) тормоза или малоинерционного электромагнитного тормоза. Частота вращения ротора в асинхронном режиме измеряется строботахометром, а в синхронном режиме контролируется строборамой или строботахометром при синхронизации последнего с сетью. Для выполнения п. 2в и 3а программы работ испытуемый двигатель должен быть сочленен со вспомогательным двигателем с широким диапазоном

регулирования частоты вращения, например с двигателем постоянного тока.

Исследование пусковых свойств двигателя. Начальные пусковые момент $M_к$ и ток $I_{Sк}$ определяются при номинальном напряжении и заторможенном роторе ($n=0$). По данным опыта рассчитываются кратности начального пускового момента $k_п=M_к/M_н$ и пускового тока $k_i=I_{Sк}/I_н$. Результирующая механическая характеристика двигателя в асинхронном режиме $M_п=f(n)$ снимается в диапазоне частот вращения $n_{кр}<n<n_{вх}$. Для увеличения зоны устойчивой работы двигателя в асинхронном режиме (за счет увеличения $n_{вх}$) рекомендуется нагрузить вал диском с большим моментом инерции (в работе для этого можно использовать ротор вспомогательного двигателя). Для снятия зависимости $I_{Sт}=f(n)$ в тормозном (генераторном) режиме двигателя необходимо отключить его от сети, сочленить со вспомогательным двигателем постоянного тока и замкнуть фазы статора накоротко через амперметр. Указанная зависимость снимается в диапазоне частот вращения от $n=n_с$ до нуля. Используя зависимость $I_{Sт}=f(n)$, можно рассчитать механическую характеристику двигателя в тормозном (генераторном) режиме $M_т=f(n)$:

$$M_т=-m_1 9{,}55 I_{Sт}^2 r_S/n, \qquad (6.6)$$

где $I_{Sт}$ и r_S — ток и активное сопротивление фазы обмотки статора.

Рис. 6.5. Схема для исследования синхронного двигателя с постоянными магнитами

Построив на одном графике зависимости $M_т=f(n)$ и $M_п=f(n)$, алгебраическим сложением соответствующих ординат находят зависимость асинхронного (двигательного) момента от частоты вращения $M_{ас}=f(n)$ и определяют крутизну пусковой механической характеристики $M_п'=20M_{п(0,95n_с)}$ при скольжении $s=0{,}05$.

Исследование рабочих свойств двигателя. Наводимая полем постоянных магнитов в обмотке статора ЭДС E_0 характеризует степень возбужденности двигателя и в значительной мере определяет его пусковые, рабочие и синхронизирующие свойства. Для определения величины E_0 необходимо сообщить ротору испытуемого двигателя с помощью вспомогательного двигателя синхронную частоту вращения. Степень возбужденности двигателя находится как отношение ЭДС на разомкнутых зажимах обмотки статора к номинальному напряжению питания: $\varepsilon=E_0/U_н$.

Рабочие характеристики двигателя I_S, P_S, P_R, $\cos\varphi$, η в зависимости от M и угловая характеристика $M_с=f(\theta_U')$ снимаются одновременно при номинальном напряжении питания и изменении нагрузки на валу синхронно работающего двигателя от 0 до $M_{вых}$.

Контроль за частотой вращения и отсчет углов нагрузки θ_U' осуществляются с помощью стробормы или стробтахометра, засинхронизированного с сетью, по шкале, размещенной на подшипниковом щите двигателя (см. § 2.2). При снятии и построении угловой характеристики СДПМ необходимо учитывать различие углов θ_U — электрического угла нагрузки и θ_U' — пространственного угла между радиальной линией, жестко связанной с ротором, и синхронно вращающейся осью. Направление этой оси характеризует направление вектора питающего напряжения. Для измерения угла θ_U' на валу ротора располагают небольшой диск с линией (меткой). Связь между электрическими и геометрическими углами устанавливается следующим соотношением: 1 град геом. $=p$ град эл.

Расчетные величины определяются по следующим формулам: потребляемая мощность (Вт) $P_S=P_\alpha \pm P_\beta$; полезная механическая мощность (Вт) $P_R=0{,}105\,Mn_c$; КПД $\eta=P_R/P_S$; коэффициент мощности $\cos\varphi=P_S/(\sqrt{3}U_н I_S)$.

По данным испытаний и расчетов строятся рабочие и угловая характеристики двигателя и определяется средний удельный синхронизирующий момент $M_{с.уд}=\Delta M_c/(p\Delta\theta_U')$ при $M_c=M_н$ и $\Delta\theta_U'=5°$ (см. рис. 6.4).

Исследование синхронизирующих свойств двигателя. Синхронизирующие свойства СДПМ определяются в основном такими техническими показателями, как момент входа в синхронизм $M_{вх}$ и момент выхода из синхронизма $M_{вых}$. Чтобы оценить влияние изменения напряжения питания на моменты входа и выхода, измеряются их значения при номинальном и пониженном до $0{,}85\,U_н$ напряжениях. Момент входа определяется максимальным моментом нагрузки, при котором двигатель еще втягивается в синхронизм; момент выхода — моментом нагрузки, при котором двигатель выпадает из синхронизма.

Момент входа рекомендуется определять из режима ресинхронизации. Для этого синхронно работающий двигатель нагружают до выхода из синхронизма (при этом определяется максимальный синхронизирующий момент $M_{вых}$). Затем, постепенно уменьшая момент сопротивления, фиксируют момент входа.

Как указывалось выше, момент входа в значительной мере зависит от момента инерции нагрузки. Для оценки влияния момента инерции на синхронизирующие свойства СДПМ определяются значения $M_{вх}$ при $J_{нагр}'\approx 2J_R$ и $J_{нагр}''\approx 5J_R$; $U=U_н$. Изменение $J_{нагр}$ осуществляется набором дисков.

По данным опытов рассчитываются кратности моментов входа и выхода по отношению к номинальному: $k_{вх}=M_{вх}/M_н$; $k_M=M_{вых}/M_н$.

При использовании данных экспериментального исследования ($M_п'$, $M_{вых}$) и приближенном решении уравнения движения ротора СДПМ [см. (6.7)] рекомендуется рассчитать и построить зависимость момента входа от суммарного момента инерции вращающихся масс.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

При обработке опытных данных следует обратить внимание на то, что пусковые свойства исследуемого двигателя определяются как соотношением, так и характером изменения асинхронного (двигательного) и генераторного (тормозного) моментов (см. рис. 6.3). Соотношение тормозного $M_т$ и двигательного $M_{ас}$ моментов характеризуется квадратом степени возбужденности двигателя ($M_т/M_{ас} \equiv \varepsilon^2$), поскольку $M_т \equiv I_{St}^2 \equiv E_0^2$ и $M_{ас} \equiv U^2$. Характер изменения указанных моментов в процессе пуска зависит от соотношения параметров обмоток двигателя. Частота вращения $n_{кр.т}$, при которой тормозной момент достигает максимального значения, зависит в основном от активного сопротивления обмотки статора, в то время как частота вращения $n_{кр.ас}$, при которой имеет место максимум двигательного момента, определяется в первую очередь активным сопротивлением короткозамкнутой обмотки ротора. В двигателях малой мощности с увеличением активных сопротивлений обмоток статора и ротора максимум тормозного момента смещается в сторону бо́льших частот вращения, а максимум двигательного момента — в сторону меньших частот вращения. При этом уменьшается результирующий пусковой момент в зоне подсинхронных частот вращения, что приводит к ухудшению синхронизирующих свойств двигателя.

Степень возбужденности характеризует не только пусковые, но и рабочие свойства двигателя. С увеличением ε возрастают перегрузочная способность двигателя и его энергетические показатели в синхронном режиме (η, $\cos\varphi$), поскольку уменьшается потребляемый из сети намагничивающий ток. Однако, как было отмечено выше, с возрастанием ε ухудшаются пусковые характеристики двигателя. Для каждого двигателя в зависимости от его мощности, полюсности и частоты питающего напряжения существует вполне определенная степень возбужденности, при которой обеспечивается наилучшее сочетание его пусковых и рабочих свойств. В имеющихся синхронных двигателях с постоянными магнитами и асинхронным пуском мощностью от 1 до 250 Вт эта величина равна 0,2—0,5.

Основной технический показатель, определяющий синхронизирующие свойства СДПМ, — момент входа в синхронизм. Его значение в значительной мере изменяется как с изменением напряжения питания, так и с изменением момента инерции вращающихся масс. Первое обстоятельство объясняется тем, что момент входа зависит не только от синхронизирующего момента ($M_\varepsilon \equiv U$; $M_{dq} \equiv \equiv U^2$), но и от крутизны асинхронной механической характеристики в зоне подсинхронных частот вращения ($M_п' \equiv U^2$). Второе обстоятельство со всей очевидностью вытекает из приближенного решения уравнения движения ротора СДПМ, которое может быть представлено в виде

$$M_{вх} = \left(-1{,}14M_п' + \sqrt{1{,}3M_п'^2 + 4M_{вых}H}\right) \Big/ \left(H/M_п'\right), \qquad (6.7)$$

где $H = J_\Sigma \omega_c^2/p$ — инерционная постоянная; $\omega_c = 2\pi f$ — электрическая синхронная угловая частота.

Как видно из выражения (6.7), момент входа убывает с возрастанием момента инерции по гиперболической зависимости.

Вопросы для самопроверки

1. Какие достоинства и недостатки имеют синхронные двигатели с постоянными магнитами?
2. Укажите особенности конструкции синхронных двигателей с радиальным и аксиальным расположением постоянных магнитов.
3. Как осуществляется пуск двигателя?
4. Какие функции выполняет в двигателе короткозамкнутая обмотка ротора?
5. Объясните возникновение тормозного момента в процессе пуска двигателя.
6. Какое влияние на пусковые и рабочие свойства оказывает степень возбужденности двигателя?
7. Дайте определение степени возбужденности двигателя.
8. Каково соотношение в СДПМ между индуктивными сопротивлениями по продольной и поперечной осям и почему?
9. Что понимается под моментом входа двигателя в синхронизм?
10. Укажите особенности угловых характеристик СДПМ. Чем вызваны эти особенности?
11. Как определяется пространственный угол нагрузки?
12. Как влияет изменение питающего напряжения на синхронизирующие свойства двигателя?
13. Какие факторы влияют на момент входа двигателя в синхронизм?
14. Как изменяется момент входа с возрастанием момента инерции вращающихся масс?
15. Что понимается под крутизной пусковой механической характеристики?

§ 6.2. СИНХРОННЫЙ РЕАКТИВНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Отличительная особенность синхронных реактивных двигателей всех типов — отсутствие какой-либо системы возбуждения на явнополюсном роторе.

По конструктивному исполнению синхронные реактивные двигатели общепромышленного назначения (СРД) близки к асинхронным двигателям с короткозамкнутым ротором, что обусловило их технологичность в производстве, надежность в эксплуатации и малую стоимость по сравнению с другими типами синхронных двигателей. Синхронные реактивные двигатели отличаются от асинхронных лишь конструкцией сердечника ротора.

Наиболее распространенная конструкция ротора СРД — простой явнополюсный ротор, междуполюсное пространство которого образуется вырубкой больших пазов (рис. 6.6, *а*). Пусковая короткозамкнутая обмотка ротора выполняется в виде беличьей клетки путем заливки всех пазов алюминием. Наилучшее сочетание пусковых и рабочих свойств СРД простой конструкции получается при коэффициенте полюсного перекрытия $\alpha = 0{,}6 \div 0{,}5$; при этом отношение синхронных индуктивных сопротивлений по продольной d и поперечной q осям ротора $x_d/x_q = 2{,}0 \div 2{,}5$. Однако даже при оптимальной геометрии ротора простые СРД имеют малую пере-

грузочную способность, большую кратность пускового тока, низкие энергетические и синхронизирующие показатели. Мощность, которую может развить простой СРД в габаритах асинхронного двигателя при равенстве суммарных потерь, не превышает 40% от мощности асинхронного двигателя [13].

Улучшение рабочих и пусковых свойств СРД связано с совершенствованием конструкции ротора. В настоящее время известны конструкции усовершенствованных двигателей с сегментным ротором (рис. 6.6, *б*), с ротором, имеющим внутренние немагнитные пазы (рис. 6.6, *в*), с секционированным ротором (рис. 6.6, *г*). Из них наибольшее распространение в нашей стране и за рубежом получила конструкция ротора, представленная на рис. 6.6, *в*. Как показали исследования, двигатели малой мощности с дополнительными внутренними синхронизирующими каналами на роторе обеспечивают в габаритах асинхронных двигателей мощность, на одну ступень меньшую мощности базового двигателя.

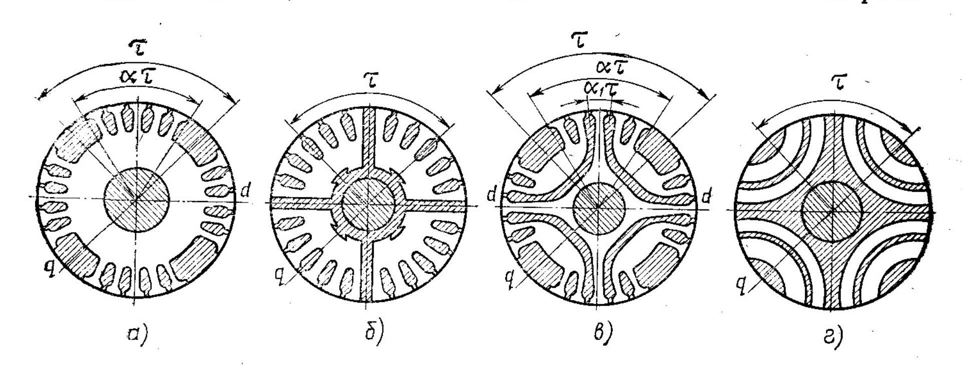
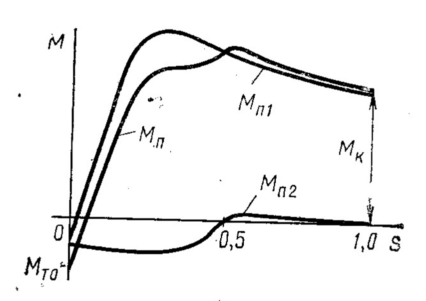


Рис. 6.6. Конструкции роторов синхронных реактивных двигателей

Из-за недостатков, присущих СРД, область их применения ограничивается электроприводами небольшой мощности с малыми моментами инерции нагрузки. Они используются там, где требуется синхронная частота вращения и где простота и надежность в эксплуатации важнее энергетических показателей.

Пуск СРД общего назначения осуществляется, как правило, под действием асинхронного момента, возникающего в результате взаимодействия вращающегося поля статора с наведенными им токами в короткозамкнутой обмотке ротора. Поскольку ротор СРД обладает магнитной и электрической несимметрией, результирующий момент в пусковом режиме $M_п$ состоит из моментов прямой $M_{п1}$ и обратной $M_{п2}$ последовательностей (рис. 6.7). Наличие отрицательного момента в зоне подсинхронных частот вращения ухудшает синхронизирующие свойства двигателя, причем тем больше, чем меньше мощность двигателя (чем выше активное сопротивление обмотки статора) и чем больше степень магнитной несимметрии ротора по осям d и q.

На практике часто используется однофазное питание синхронных микродвигателей. В этом случае в одну из фаз обмотки статора включается, как правило, конденсатор. Несимметричное питание обмотки статора приводит в общем случае к образованию в воздушном зазоре машины эллиптического вращающегося магнитного поля, что, в свою очередь, вызывает появление дополнительного тормозного момента во всем диапазоне скольжений двигательного режима. Начальный пусковой момент СРД при однофаз-



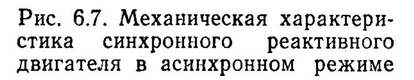


Рис. 6.7. Механическая характеристика синхронного реактивного двигателя в асинхронном режиме

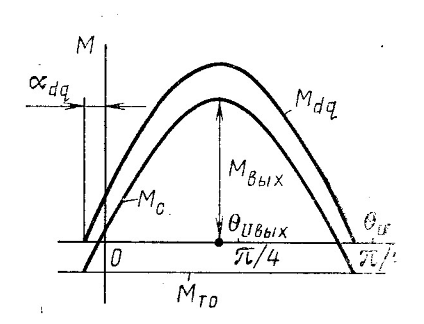


Рис. 6.8. Угловая характеристика синхронного реактивного двигателя

ном питании зависит от положения ротора в пространстве, и при значительной электрической и магнитной несимметрии может возникнуть явление залипания ротора.

Втягивание СРД в синхронизм происходит под действием синхронизирующего момента, который создается за счет разности магнитных проводимостей ротора по продольной и поперечной осям вследствие того, что явно выраженные полюса ротора стремятся расположиться по оси вращающегося поля статора. Выражение электромагнитного момента реактивного двигателя в рабочем режиме можно получить из уравнений (6.1)—(6.5), если принять $\varepsilon=0$ (см. § 6.1). Угловая характеристика СРД $M_c=f(\theta_U)$ показана на рис. 6.8. Угол нагрузки θ_U представляет собой угол на пространственно-временно́й комплексной плоскости между вектором напряжения питания и поперечной осью ротора. Если в двигателях большой мощности ($r_S\approx 0$) максимум синхронизирующего момента имеет место при угле нагрузки $\theta_{U\,вых}=\pi/4$, то в двигателях малой мощности — при угле $\theta_{U\,вых}=\pi/4-\alpha_{dq}$. Угол смещения α_{dq} тем больше, чем выше активное сопротивление обмотки статора.

Синхронизирующие свойства СРД определяются максимальным моментом нагрузки, при котором двигатель еще втягивается в синхронизм, — моментом входа в синхронизм $M_{вх}$. Момент входа зависит от максимально синхронизирующего момента (момента выхода из синхронизма $M_{вых}$), момента инерции вращающихся масс J, крутизны пусковой механической характеристики $M_п'$ и может

быть найден из приближенного решения уравнения движения ротора СРД:

$$M_{\text{вх}} = \frac{-1{,}14M'_{\text{п}} + \sqrt{1{,}3M'^{2}_{\text{п}} + 8M_{\text{вых}}H}}{2H/M'_{\text{п}}}, \qquad (6.8)$$

где $H = J\omega_c^2/p$ — инерционная постоянная вращающихся масс, причем $\omega_c = 2\pi f$ — электрическая угловая скорость поля якоря; p — число пар полюсов.

В данной работе предлагается программа исследований пусковых, рабочих и синхронизирующих свойств синхронного реактивного микродвигателя общего назначения при однофазном конденсаторном питании.

ПРОГРАММА РАБОТЫ

А. Экспериментальные исследования

1. Ознакомиться с конструкцией и паспортными данными двигателя.

2. Исследовать пусковые свойства двигателя: а) определить начальные пусковые моменты $M_{\text{к}}$ и токи $I_{S\text{к}}$ при $U = U_{\text{н}}$ и $C = C_{\text{н}}$ для различных значений углового положения ротора; б) снять результирующую механическую характеристику двигателя в асинхронном режиме $M_{\text{п}} = f(n)$ при $U = U_{\text{н}}$ и $C = C_{\text{н}}$ в диапазоне частот вращения $n_{\text{кр}} < n < n_{\text{вх}}$.

3. Исследовать рабочие свойства двигателя: а) снять рабочие характеристики U_C, U_B, I_S, I_A, I_B, P_S, P_A, P_B, P_R, $\cos\varphi_S$, $\cos\varphi_A$, $\cos\varphi_B$, η в зависимости от M при $U = U_{\text{н}}$ и $C = C_{\text{н}}$; б) снять угловую характеристику двигателя $M_{\text{с}} = f(\theta_U')$ при $U = U_{\text{н}}$ и $C = C_{\text{н}}$.

4. Исследовать синхронизирующие свойства двигателя: а) определить момент входа в синхронизм $M_{\text{вх}}$ и момент выхода из синхронизма $M_{\text{вых}}$ при $C = C_{\text{н}}$; $U = U_{\text{н}}$ и $U = 0{,}85U_{\text{н}}$; б) определить моменты входа и выхода при $U = U_{\text{н}}$, $C < C_{\text{н}}$ и $C > C_{\text{н}}$.

Б. Расчеты и построения

1. Построить зависимость начального пускового момента от углового положения ротора в пространстве $M_{\text{к}} = f(\gamma)$; определить максимальный и минимальный начальные пусковые моменты; вычислить кратности среднего начального пускового момента $k_{\text{п}} = M_{\text{к.ср}}/M_{\text{н}}$ и пускового тока $k_i = I_{S\text{к}}/I_{\text{н}}$.

2. Построить механическую характеристику двигателя в асинхронном режиме $M_{\text{п}} = f(n)$ и определить ее крутизну при $n = 0{,}95n_c$.

3. Построить рабочие и угловую характеристики двигателя $U_{\text{к}}$, U_B, I_S, I_A, I_B, P_S, P_A, P_B, P_R, $\cos\varphi_S$, $\cos\varphi_A$, $\cos\varphi_B$, η в зависимости от M и $M_{\text{с}} = f(\theta'_U)$.

4. Для номинального режима конденсаторного СРД построить векторную диаграмму токов и напряжений и рассчитать степень эллиптичности МДС.

5. Вычислить кратности моментов входа и выхода при различных напряжениях питания и емкости конденсатора.

6. Используя опытные данные, рассчитать по выражению (6.8) зависимость момента входа от момента инерции.

ПОЯСНЕНИЯ И УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

Перед началом работы следует ознакомиться с конструкцией и паспортными данными двигателя и рассчитать номинальный момент (Н·м):

$$M_{н}=9{,}55P_{Rн}/n_{с},$$

где $P_{Rн}$ — номинальная полезная мощность двигателя, Вт; $n_{с}$ — синхронная частота вращения ротора, об/мин.

Программа экспериментальных исследований выполняется по схеме, представленной на рис. 6.9. Двигатель питается от

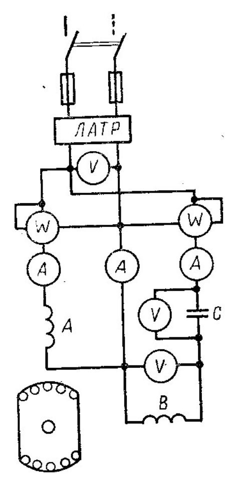


Рис. 6.9. Схема для исследования конденсаторного синхронного реактивного двигателя

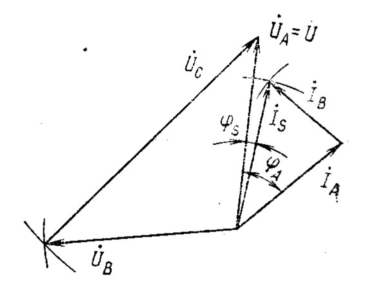


Рис. 6.10. Векторная диаграмма токов и напряжений конденсаторного синхронного реактивного двигателя

однофазной сети переменного тока через автотрансформатор с плавным регулированием напряжения. Нагрузочный момент на валу двигателя создается и измеряется малоинерционным электромагнитным тормозом. Измерение и контроль частоты вращения ротора осуществляются с помощью строботахометра.

Исследование пусковых свойств двигателя. Для снятия зависимости начального пускового момента $M_{к}$ от углового положения ротора γ на диске тормоза должен быть предусмотрен ряд отверстий. Указанная зависимость снимается при заторможенном роторе ($n=0$), номинальном напряжении питания ($U=U_{н}$) и номинальной емкости конденсатора ($C=C_{н}$). Одновременно определяется пусковой ток $I_{Sк}$. По данным опыта строится зависимость $M_{к}=f(\gamma)$, определяются максимальный и минимальный начальные пусковые моменты и рассчитываются кратность среднего начального момен-

та $k_п = (M_{к.макс} + M_{к.мин})/(2M_н)$ и кратность пускового тока $k_i = I_{Sк}/I_н$.

Результирующая механическая характеристика двигателя в асинхронном режиме $M_п = f(n)$ снимается в диапазоне частот вращения $n_{кр} < n < n_{вх}$ (см. § 6.1). Крутизна пусковой механической характеристики определяется при скольжении $s = 0{,}05$: $M_п' = 20M_{п(0,95n_c)}$.

Исследование рабочих свойств двигателя. Рабочие и угловая характеристики двигателя снимаются одновременно при номинальных значениях напряжения питания и емкости конденсатора в диапазоне нагрузок от холостого хода до момента выхода ротора из синхронизма. Контроль за частотой вращения и отсчет пространственных углов нагрузки θ_U' осуществляются с помощью стробпотахометра, засинхронизированного с сетью (см. § 2.3). Шкала отсчета углов θ_U' располагается на подшипниковом щите двигателя; на валу ротора размещается либо стрелка, либо небольшой шкив с меткой. Угол θ_U' отличается от угла θ_U из-за наличия механических потерь. При построении угловой характеристики $M_c = f(\theta_U')$ необходимо учитывать соотношение между электрическими и геометрическими углами: 1 град геом. $= p$ град эл.

Расчетные величины определяются по формулам $P_S = P_A + P_B$; $P_R = 0{,}105Mn_c$; $\eta = P_R/P_S$; $\cos\varphi_i = P_i/(U_н I_i)$, где $i = A, B, S$.

Используя данные при номинальной нагрузке двигателя, строят векторную диаграмму напряжений и токов (рис. 6.10) и рассчитывают коэффициент $k_\varepsilon = kI_B/I_A$, характеризующий степень эллиптичности МДС. Если коэффициент трансформации $k = w_B k_{оB}/(w_A k_{оA})$ неизвестен, то его определяют опытным путем (см. § 5.3).

Исследование синхронизирующих свойств двигателя. Основными техническими показателями СРД, характеризующими его синхронизирующие свойства, являются момент входа в синхронизм и момент выхода из синхронизма, который, кроме того, определяет перегрузочную способность двигателя.

Для оценки влияния напряжения питания и емкости конденсатора на синхронизирующие свойства СРД измеряют моменты входа и выхода при двух значениях напряжения ($U = U_н$ и $U = 0{,}85U_н$ при $C = C_н$) и при трех значениях емкости ($C_1 = C_н$; $C_{2,3} \lessgtr C_н$ при $U = U_н$). Момент входа рекомендуется определять из режима ресинхронизации. Для этого синхронно работающий двигатель нагружают до выхода из синхронизма, при этом определяют момент выхода. Затем, постепенно уменьшая момент сопротивления, фиксируют момент входа.

По опытным данным рассчитывают перегрузочную способность двигателя $k_M = M_{вых}/M_н$ и кратность момента входа $k_{вх} = M_{вх}/M_н$ при номинальных значениях напряжения питания и емкости конденсатора.

Используя данные экспериментального исследования ($M_п'$, $M_{вых}$) и приближенное решение уравнения движения ротора (6.8), рассчитывают зависимость $M_{вх} = f(J)$ для $J_1 = J_R$; $J_2 = 2{,}5J_R$; $J_3 = 5J_R$; $J_4 = 10J_R$.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

При обработке опытных данных следует обратить внимание на то, что начальный пусковой момент конденсаторного СРД зависит от положения ротора в пространстве. При этом переменная составляющая начального момента обусловлена асимметрией фазных токов и разностью индуктивных сопротивлений по продольной и поперечной осям ротора. Если емкость конденсатора выбрана из условия образования кругового вращающегося поля в номинальном режиме, то в пусковом режиме поле будет эллиптическим. При большой несимметрии токов в фазах может возникнуть явление залипания ротора [13].

В синхронных реактивных двигателях магнитное поле создается намагничивающим током, потребляемым из сети, а разность индуктивных сопротивлений по осям d и q обеспечивается введением дополнительного магнитного сопротивления (увеличением воздушного зазора) по поперечной оси ротора. В связи с этим коэффициенты мощности фаз, а следовательно, и КПД реактивных двигателей сравнительно невелики. Общий коэффициент мощности ($\cos \varphi_S$) можно повысить при однофазном питании за счет включения конденсатора. Максимальный синхронизирующий момент СРД тем больше, чем сильнее выражена явнополюсность двигателя. Однако в двигателях малой мощности (при больших r_S) увеличение разности индуктивных сопротивлений по осям d и q не приводит к заметному увеличению синхронизирующего момента из-за роста тормозного момента. Поэтому перегрузочная способность СРД малой мощности обычно невелика: $k_M = 1{,}2 \div 1{,}4$.

Момент входа в синхронизм, определяющий синхронизирующие свойства СРД, в значительной мере зависит от напряжения питания. Объясняется это тем, что момент выхода из синхронизма и крутизна пусковой механической характеристики пропорциональны квадрату питающего напряжения ($M_{\text{вых}} \equiv U^2$, $M_{\text{п}}' \equiv U^2$). Влияние емкости конденсатора на момент входа обусловлено тем, что с изменением емкости изменяется степень эллиптичности магнитного поля.

Для того чтобы нагруженный ротор вошел в синхронизм, синхронизирующие силы должны совершить определенную работу, затрачиваемую на преодоление момента сопротивления нагрузки и увеличение кинетической энергии вращающихся масс. Максимальное значение этой работы определяется площадью угловой характеристики и для каждого двигателя постоянно. С возрастанием момента инерции нагрузки кинетическая энергия при синхронной частоте вращения увеличивается и, следовательно, двигатель может втянуть в синхронизм нагрузку с уменьшенным моментом сопротивления.

Вопросы для самопроверки

1. Какие типы роторов применяются в СРД?
2. Как осуществляется пуск двигателя?

3. За счет чего возникают вращающие моменты в асинхронном и синхронном режимах?

4. Что понимается под крутизной пусковой механической характеристики?

5. Объясните характер зависимости вращающего момента от угла нагрузки.

6. Какое магнитное поле создается в конденсаторном СРД?

7. Как определить степень эллиптичности МДС?

8. Как измеряется угол нагрузки?

9. Почему двигатель называется реактивным?

10. Чем определяются синхронизирующие свойства двигателя?

11. Дайте определение момента входа в синхронизм и момента выхода из синхронизма.

12. Каково назначение конденсатора при однофазном питании СРД?

13. Объясните зависимость момента входа от момента инерции вращающихся масс.

§ 6.3. СИНХРОННЫЙ ГИСТЕРЕЗИСНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Синхронные гистерезисные двигатели (СГД) широко применяются в различных электроприводах и схемах автоматики, особенно там, где требуются небольшие мощности (до 100 Вт). Основные требования, предъявляемые к двигателям, отражены в ГОСТ 16264—78.

Статор гистерезисного двигателя не отличается от статоров обычных синхронных или асинхронных машин. В пазах статора располагается трех- или двухфазная (у однофазных конденсаторных двигателей) обмотка. Ротор гистерезисного двигателя представляет собой сплошной (массивный) или шихтованный (набранный из листов) цилиндр, выполненный из магнитожесткого материала, имеющего широкую петлю гистерезиса и, следовательно, обладающего большими остаточным магнетизмом B_r и коэрцитивной силой H_c (викаллой, альнико и др.).

Основной гистерезисный вращающий момент $M_г$ в гистерезисном двигателе создается за счет взаимодействия вращающегося магнитного поля статора с магнитным полем ротора, возникающим в результате его намагничивания полем статора [2]. Кроме основного гистерезисного момента у гистерезисных двигателей со сплошным (не шихтованным) ротором имеется еще момент от вихревых токов — асинхронный момент, возникающий в результате взаимодействия вращающегося поля статора с наведенными вихревыми токами в теле ротора. Значение этого момента не велико и не постоянно. Так как активное сопротивление ротора велико ($s_{кр}>1$), то момент максимален при пуске и равен нулю при синхронизме (см. рис. 6.12).

Природа гистерезисного момента объясняется наличием у ротора широкой петли гистерезиса (большого остаточного магнетизма). Для выяснения физической сущности гистерезисного момента представим, что ротор гистерезисного двигателя внесен в магнитное поле, созданное двумя полюсами магнита (рис. 6.11, *а*). Под действием внешнего поля ротор намагнитится — элементарные магнитики ротора будут ориентироваться по полю. В результате взаимодействия внешнего поля с полем ротора возникнут радиальные силы.

Эти силы, как видно из рисунка, никакого вращающего момента не создадут.

Если полюса магнита (внешнее поле) вращать относительно ротора (рис. 6.11, *б*), то элементарные магнитики (поле ротора) будут поворачиваться вслед за полем полюсов. Однако вследствие молекулярного трения, которое у материалов с широкой петлей гистерезиса очень велико, они при вращении будут несколько отставать от поля полюсов. Суммарное поле всех элементарных магнитиков — поле ротора — будет повернуто относительно поля полюсов на некоторый угол θ. Силы взаимодействия между элементарными магнитиками и полем полюсов в этом случае кроме нормальных составляющих F_n будут иметь еще тангенциальные составляющие F_t, которые создадут вращающий гистерезисный момент. Значение этого момента зависит от внешнего поля, намагниченности ротора, свойств материала ротора (B_r и H_c) и не зависит от частоты вращения.

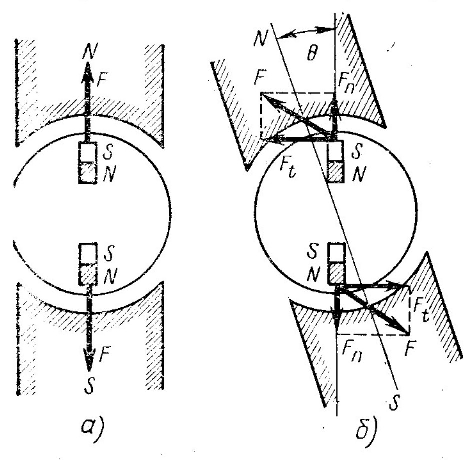


Рис. 6.11. Схема образования гистерезисного момента

Механическая характеристика двигателя, обладающего только гистерезисным моментом, имеет вид прямой линии (рис. 6.12). Результирующий момент M гистерезисного двигателя со сплошным ротором может быть получен сложением двух моментов: гистерезисного $M_г$ и от вихревых токов $M_в$.

Гистерезисный момент возникает не только в гистерезисных двигателях, но и в обычных асинхронных двигателях. Однако значение его вследствие узкой петли гистерезиса материала роторов обычных двигателей незначительно и им пренебрегают.

В настоящее время с целью экономии дорогостоящего магнитожесткого материала роторы гистерезисных двигателей обычно делаются сборными. Они состоят из втулки *1* (рис. 6.13), наружного шихтованного или сплошного кольца *2* из магнитожесткого материала, запорного кольца *3* и вала *4*. В зависимости от свойств магнитожесткого материала втулка выполняется либо из стали, если материал кольца имеет малую магнитную проницаемость, либо из алюминия, если материал кольца имеет большую магнитную проницаемость.

Гистерезисный двигатель может работать как в синхронном, так и в асинхронном режимах. Однако в асинхронном режиме он используется сравнительно редко, так как вследствие перемагничивания стали ротора в нем возникают большие потери. В синхрон-

ном режиме ротор не перемагничивается и потери в стали ротора не возникают.

Преимуществами синхронных гистерезисных двигателей, которые способствовали их быстрому распространению в технике, являются: большой пусковой момент и момент входа в синхронизм, плавность входа в синхронизм — отсутствие рывка, незначительное изменение тока (20—30%) при изменении нагрузки от короткого замыкания (пуск) до холостого хода, сравнительно высокий КПД

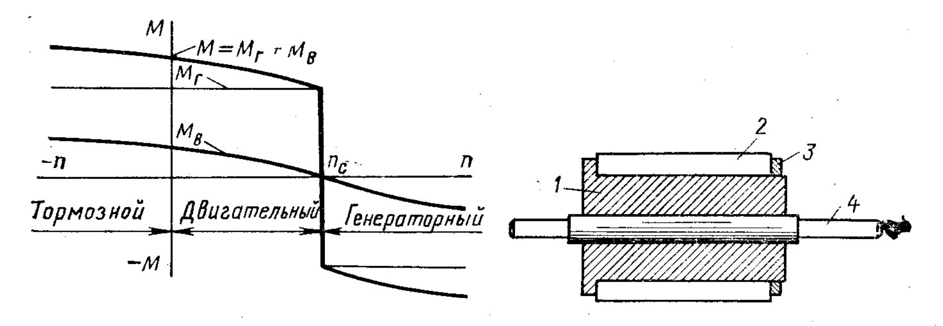


Рис. 6.12. Механическая характеристика гистерезисного двигателя

Рис. 6.13. Конструкция ротора гистерезисного двигателя

(до 60%), свойство полисинхронизма ротора — способность одного и того же ротора работать во вращающихся полях различной полюсности, надежная и бесшумная работа, простота конструкции.

К недостаткам гистерезисного двигателя следует отнести прежде всего низкий коэффициент мощности cos φ (0,3 ÷ 0,45) вследствие малой магнитной проницаемости материала ротора в асинхронном режиме и, кроме того, малой намагниченности ротора в синхронном режиме.

Энергетические показатели гистерезисного двигателя (η, cos φ, P_R) можно значительно увеличить путем подмагничивания ротора в синхронном режиме посредством кратковременного (на 2—3 периода) повышения магнитного потока статора, например путем увеличения подводимого к статору напряжения. Подмагниченный ротор создает большую долю основного рабочего магнитного потока двигателя, разгружая обмотку статора от реактивного намагничивающего тока.

Подмагничивание влияет на характеристики двигателя и зависит от материала ротора и конструкции двигателя: чем больше коэрцитивная сила материала ротора и длиннее магнитные силовые линии в роторе, тем больше сказывается подмагничивание.

Существенным недостатком синхронных гистерезисных двигателей является то, что их роторы при резких изменениях нагрузки способны длительное время качаться (колебаться), нарушая равномерность хода. Это особенно сильно ощущается у двигателей, имеющих шихтованный ротор. Причина длительных качаний ро-

торов — отсутствие успокаивающей качания короткозамкнутой обмотки, которая имеется, например, у синхронных реактивных двигателей.

Качания гистерезисных двигателей со сплошным (массивным) ротором менее значительны. Однако и у них они ощутимы, так как вихревые токи, возникающие при качаниях в теле ротора, вследствие их малости из-за большого удельного сопротивления материала ротора не могут создать значительный демпфирующий момент.

Вызываемая качаниями ротора неравномерность хода ограничивает область применения гистерезисных двигателей: не позволяет широко использовать их в приборах звукозаписи, в различных лентопротяжных устройствах и т. п. Длительное время препятствием для широкого применения гистерезисных двигателей была высокая стоимость магнитожестких материалов. Однако сейчас это препятствие устранено — создан ряд сравнительно недорогих магнитожестких материалов.

ПРОГРАММА РАБОТЫ

А. Экспериментальные исследования

1. Ознакомиться с конструкцией синхронного гистерезисного микродвигателя и его паспортными данными.

2. Снять нормальные рабочие характеристики двигателя (без подмагничивания его ротора) P_S, P_R, I_S, η, $\cos\varphi$ в зависимости от M при $U=U_{н}$.

3. Снять рабочие характеристики двигателя после подмагничивания ротора [кратковременного повышения напряжения питания до $U=(1{,}5\div1{,}8)\,U_{н}$] P_S, P_R, I_S, η, $\cos\varphi$ в зависимости от M при $U=U_{н}$.

4. Произвести наблюдение за качанием ротора.

5. Снять зависимости тока статора I_S, потребляемой мощности P_S и коэффициента мощности $\cos\varphi$ от напряжения питания при постепенном понижении напряжения от $U=(1{,}5\div1{,}8)\,U_{н}$ до $U=(0{,}4\div0{,}5)\,U_{н}$ в режиме холостого хода двигателя.

Б. Расчеты и построения

1. Выполнить эскиз ротора синхронного гистерезисного двигателя.

2. Построить на одном графике рабочие характеристики двигателя до и после подмагничивания P_S, P_R, I_S, η, $\cos\varphi$ в зависимости от M.

3. Рассчитать кратности момента выхода из синхронизма (до и после подмагничивания) и кратности начального пускового момента и пускового тока $k_M=M_{вых}/M_{н}$; $k_{п}=M_{к}/M_{н}$; $k_i=I_{Sк}/I_{н}$.

4. Построить зависимости тока статора I_S, потребляемой мощности P_S и коэффициента мощности $\cos\varphi$ от напряжения питания при холостом ходе двигателя.

ПОЯСНЕНИЯ И УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

В данной работе исследуется трехфазный синхронный гистерезисный двигатель.

Для проведения испытаний необходимо собрать схему, представленную на рис. 6.14. Питание двигателя осуществляется от трехфазной сети переменного тока через индукционный регулятор или

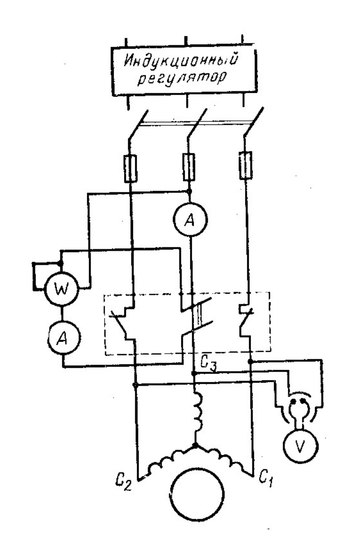


Рис. 6.14. Схема соединений для испытания гистерезисного двигателя

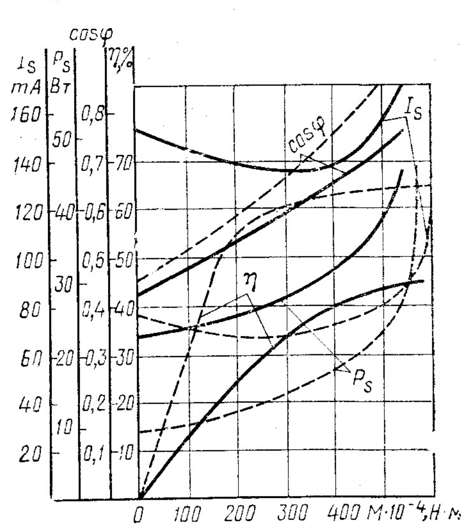


Рис. 6.15. Рабочие характеристики гистерезисного двигателя:

——— до подмагничивания;

— — — после подмагничивания

иное устройство, с помощью которого регулируется напряжение на зажимах двигателя. Момент на валу двигателя создается и измеряется с помощью ленточного (нитяного) или электромагнитного тормоза. Частота вращения в синхронном режиме контролируется с помощью неоновой лампы или механической строборамы. Частота вращения в асинхронном режиме измеряется посредством строботахометра.

Рабочие характеристики гистерезисного двигателя при номинальном напряжении. Зависимости P_S, P_R, I_S, η, cos φ от M снимаются при $U=U_н$, указанном в его паспорте. Здесь $P_R=1{,}05M\cdot n$; $\eta=P_R/P_S$; $\cos\varphi=P_S/(\sqrt{3}U_SI_S)$.

При проведении данного эксперимента необходимо определить начальный пусковой момент $M_к$ — момент при $n=0$, момент входа в синхронизм $M_{вх}$ — максимальный момент, при котором двигатель еще втягивается в синхронизм, и момент выхода из синхронизма $M_{вых}$ — максимальный момент при синхронной скорости.

Рабочие характеристики двигателя после подмагничивания (рис. 6.15). Они снимаются после предварительного (кратковременного)

повышения подводимого к двигателю напряжения, осуществляемого следующим образом: с помощью индукционного регулятора или иного регулирующего напряжение устройства напряжение на зажимах двигателя при холостом ходе $M=0$ быстро поднимается до значения $U=(1{,}8\div2)\,U_н$ и сразу же так же быстро уменьшается до номинального значения.

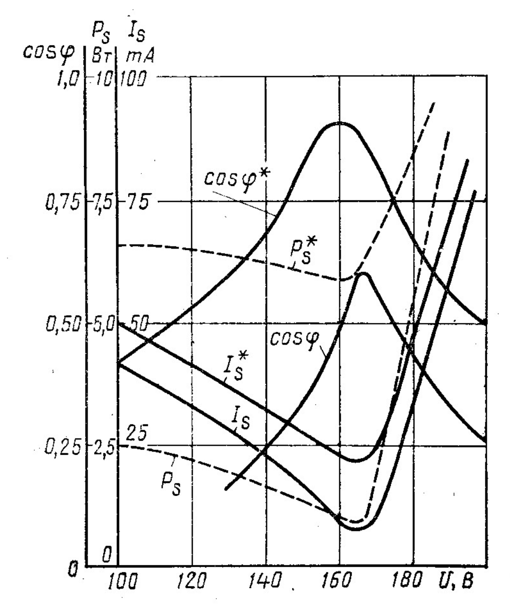


Рис. 6.16. Характеристики, показывающие влияние намагниченности ротора на потребляемые ток и мощность

После подмагничивания необходимо сразу же, не выводя двигатель из синхронизма, приступать к снятию рабочих характеристик.

При определении рабочих характеристик после подмагничивания необходимо с помощью неоновой лампы следить за тем, чтобы ротор двигателя не выходил из синхронизма, так как даже кратковременный выход ротора из синхронизма приводит к его перемагничиванию.

Если во время эксперимента ротор случайно выпал из синхронизма, то его нужно снова подмагнитить, точно так же, как в первый раз. *При этом необходимо помнить, что подмагничивание нужно производить быстро,* ибо длительное повышение напряжения на зажимах двигателя свыше номинального может привести к перегреванию обмоток и к выходу двигателя из строя.

При исследовании двигателя после подмагничивания необходимо определить момент выхода из синхронизма и пусковой момент.

Наблюдение за качанием ротора осуществляется с помощью строборамы или неоновой лампы при холостом ходе двигателя. Для того чтобы ротор начал качаться, его нужно резко кратковременно нагрузить путем прикосновения к ободу насаженного на вал диска карандашом.

Исследование влияния намагниченности ротора на ток и мощность, потребляемые двигателем. Это исследование (рис. 6.16) производится путем снятия характеристик I_S, P_S, $\cos\varphi$ в зависимости от U при холостом ходе двигателя $(M=0)$.

Первоначально на зажимы двигателя подается напряжение $U=(1{,}5\div2)\,U_н$. При этом снимаются первые показания приборов. Затем напряжение постепенно снижается до $U=(0{,}4\div0{,}5)\,U_н$.

Эксперимент при напряжениях свыше номинального следует производить быстро, с тем чтобы избежать чрезмерного перегрева обмоток двигателя.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализируя результаты исследований гистерезисного двигателя, нетрудно убедиться в том, что его пусковой ток всего на 10—30% превышает ток холостого хода. Это объясняется тем, что основной составляющей тока I_S гистерезисного двигателя является намагничивающий ток I_μ, который достигает 80—90% от номинального. При увеличении нагрузки на валу ток I_S возрастает за счет активной составляющей I_a, которая даже при номинальной нагрузке не превышает намагничивающего тока:

$$\cos\varphi = I_a/I_S = I_a \Big/ \sqrt{I_\mu^2 + I_a^2} = 0{,}3 \div 0{,}7.$$

В некоторых двигателях, имеющих большое активное сопротивление обмотки статора, при увеличении момента нагрузки на валу M (см. рис. 6.15) ток I_S вначале уменьшается, а затем начинает постепенно возрастать. Первоначальное уменьшение тока I_S объясняется тем, что при малых нагрузках вследствие определенного соотношения параметров двигателя намагничивающий ток уменьшается на бóльшую величину, чем увеличивается активная составляющая тока.

Повышение $\cos\varphi$ при увеличении нагрузки M объясняется ростом активной составляющей тока и некоторым уменьшением намагничивающего тока.

К значительному улучшению энергетических показателей двигателей η, $\cos\varphi$ приводит перевозбуждение двигателя — кратковременное (на 2—3 периода) повышение напряжения питания в синхронном режиме. Последнее объясняется тем, что при перевозбуждении магнитотвердый материал ротора намагничивается значительно сильнее, чем при номинальном напряжении, и магнитный поток, создаваемый ротором, значительно возрастает.

Изменения тока, мощности, потребляемых двигателем, и его коэффициента мощности, которые наблюдаются при уменьшении напряжения питания двигателя после его перевозбуждения (см. рис. 6.16), могут быть объяснены следующим образом. Основной магнитный поток любой электрической машины переменного тока в режимах от холостого хода до номинального практически не изменяется и определяется приложенным напряжением U, частотой сети f и эффективным числом витков wk_0: $\Phi \approx U/(4{,}44 f w k_0)$.

В синхронном гистерезисном двигателе основной рабочий поток Φ является суммой потоков: потока статора, создающегося намагничивающим током I_μ его обмотки, и потока ротора. Намагничивающий ток, таким образом, зависит от степени намагниченности ротора. Чем сильнее намагничен ротор, тем бóльшую часть основного рабочего магнитного потока он создает и тем меньше доля участия

статора в создании рабочего потока, а следовательно, меньше намагничивающий ток I_μ.

Если намагниченность ротора оставлять неизменной, а уменьшать основной рабочий поток двигателя, снижая напряжение на его зажимах, то вместе с основным потоком Ф уменьшается и намагничивающий ток I_μ. При некотором U весь поток Ф будет создаваться ротором и намагничивающий ток I_μ будет равен нулю. Если после этого напряжение вновь уменьшить, то из сети снова пойдет реактивный ток, но только не отстающий, а опережающий. Далее с уменьшением напряжения ток, потребляемый двигателем из сети, увеличивается за счет опережающего тока.

В гистерезисных двигателях малой мощности минимум тока даже при $M \approx 0$ не равен нулю, что объясняется наличием активной составляющей тока, обусловленной механическими потерями, и реактивной составляющей, обусловленной полями рассеяния.

Вопросы для самопроверки

1. Как устроен гистерезисный двигатель?
2. За счет чего создается гистерезисный момент?
3. Какой вид имеет механическая характеристика гистерезисного двигателя? Как ее объяснить?
4. Назовите преимущества гистерезисного двигателя.
5. Укажите недостатки гистерезисного двигателя.
6. Что дает перевозбуждение гистерезисного двигателя?
7. Каким образом влияет намагниченность ротора на ток и мощность, потребляемые гистерезисным двигателем?
8. Чем объяснить качания ротора гистерезисного двигателя?

Глава 7

ИСПЫТАНИЕ УНИВЕРСАЛЬНОГО КОЛЛЕКТОРНОГО МИКРОДВИГАТЕЛЯ

Коллекторный двигатель с последовательной обмоткой возбуждения, имеющий приблизительно одинаковые рабочие характеристики как на постоянном, так и на однофазном переменном токе, называется *универсальным коллекторным двигателем* (УКД). Такие двигатели выпускаются на относительно малые мощности и различные частоты вращения, достигающие нескольких десятков тысяч оборотов в минуту.

По конструкции рассматриваемый двигатель подобен машине постоянного тока с последовательной обмоткой возбуждения без дополнительных полюсов. Отличие состоит лишь в том, что не только якорь, но и статор УКД набирается из листовой электротехнической стали. На рис. 7.1 изображен лист статора УКД.

Возможность непосредственного получения высокой частоты вращения и ее плавного регулирования — большое достоинство коллекторных двигателей. В связи с этим они широко применяются

во многих бытовых машинах (пылесосах, швейных машинах, кофемолках, миксерах), в электродрелях, медицинской технике, технике связи и др.

К недостаткам УКД относятся: сравнительная сложность их эксплуатации, повышенная шумность, особенно при высоких частотах вращения, радиопомехи и трудность получения безыскровой коммутации на переменном токе. Это объясняется прежде всего тем, что в коммутируемых секциях кроме ЭДС вращения $e_{вр}$ и реактивной ЭДС $e_р$ наводится ЭДС трансформации $e_т$ вследствие пульсации потока полюсов $\Phi_в$. Векторная диаграмма ЭДС в коммутируемой секции, построенная в предположении, что отсутствуют потери в стали двигателя и размагничивающее действие коммутационных токов, приведена на рис. 7.2.

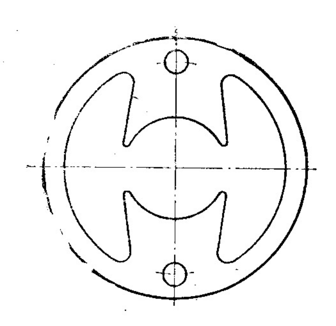


Рис. 7.1. Лист статора универсального коллекторного двигателя

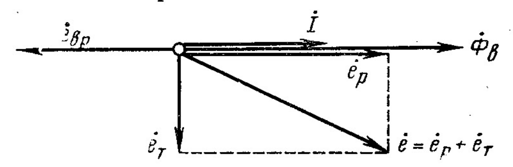


Рис. 7.2. Векторная диаграмма ЭДС, действующих в коммутируемой секции универсального коллекторного двигателя при работе от сети переменного тока

Для безыскровой коммутации необходимо, чтобы

$$\dot{e}_р + \dot{e}_т + \dot{e}_{вр} = 0, \qquad (7.1)$$

т. е. для выполнения этого условия требуется, чтобы ЭДС $\dot{e}_{вр}$ была равна по амплитуде и противоположна по знаку геометрической сумме ЭДС $(\dot{e}_р + \dot{e}_т)$. Так как ЭДС $\dot{e}_р$ и $\dot{e}_{вр}$ изменяются прямо пропорционально линейной скорости якоря, а ЭДС $e_т$ от нее не зависит, то осуществить равенство (7.1) на практике не удается. Особенно неблагоприятные условия возникают при пуске в ход, когда ЭДС $\dot{e}_т$ достигает относительно больших значений из-за увеличения потока, обусловленного возрастанием тока. Для достижения удовлетворительной коммутации необходимо ограничить ЭДС трансформации. Для этой цели целесообразно увеличивать число пластин коллектора и уменьшать число витков в секции обмотки якоря. Для снижения тока в коммутируемых секциях следует выбирать щетки с большим сопротивлением.

Рассмотрим вращающий момент УКД при питании постоянным и переменным током.

При питании постоянным током

$$M = [1/(2\pi)](p/a) NI\Phi, \qquad (7.2)$$

где p — число пар полюсов; a — число пар параллельных ветвей;

N — число проводников обмотки якоря; I — ток якоря; Φ — поток полюсов.

При питании переменным током $i = I_m \sin \omega t$ и $\Phi = \Phi_m \sin(\omega t - \beta)$, где β — угол сдвига фаз между током и потоком полюсов, обусловленный потерями в стали и размагничивающим

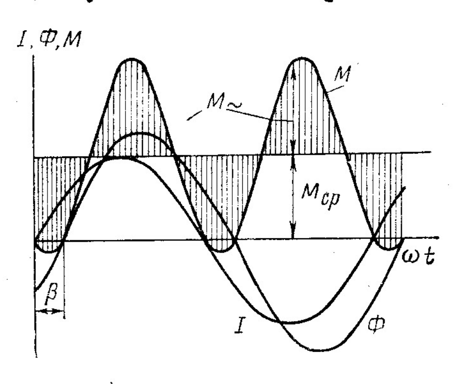


Рис. 7.3. Зависимость вращающего момента универсального коллекторного двигателя от времени при работе от сети переменного тока

Рис. 7.4. Электрическая схема универсального коллекторного двигателя

действием токов в коммутируемых секциях. Учитывая, что $\sin \omega t \sin(\omega t - \beta) = 0{,}5[\cos \beta - \cos(2\omega t - \beta)]$, найдем

$$M = [pN/(4\pi a)]\,\Phi_m I_m [\cos \beta - \cos(2\omega t - \beta)] = M_{ср} + M_{\sim}. \qquad (7.3)$$

Формула (7.3) показывает, что вращающий момент в УКД при питании переменным током можно представить в виде двух составляющих. Одна из них, $M_{ср}$, не зависит от времени; другая, $M_{\sim}$, изменяется во времени с двойной частотой (рис. 7.3) по отношению к частоте питающего напряжения. На практике переменный момент не создает неравномерности вращения, так как этому препятствует инерция ротора. Для получения большей постоянной составляющей момента необходимо, чтобы угол β был мал. Это достигается последовательным соединением обмоток возбуждения и якоря.

Электрическая схема УКД представлена на рис. 7.4. Обмотка возбуждения состоит из двух катушек, одна из которых соединяется со щеткой положительной полярности, а другая — со щеткой отрицательной полярности. Получается симметричная электрическая цепь, обеспечивающая меньшие радиопомехи. Как видно из схемы, при работе УКД на переменном токе напряжение подается не на всю обмотку возбуждения, а только на часть ее. Этим достигается примерно одна и та же частота вращения при номинальном моменте на валу и номинальных напряжениях на постоянном и переменном токе.

Регулирование частоты вращения УКД можно осуществлять

четырьмя основными способами. Электрические схемы регулирования частоты вращения представлены на рис. 7.5: *а* — изменением напряжения, подводимого к двигателю; *б* — включением активного сопротивления параллельно обмотке возбуждения (шунтирование обмотки возбуждения), *в* — включением активного сопротивления параллельно якорю (шунтирование обмотки якоря); *г* — включением добавочного сопротивления последовательно с якорем.

Сравнение перечисленных способов регулирования частоты вращения показывает, что наиболее экономичным из них является спо-

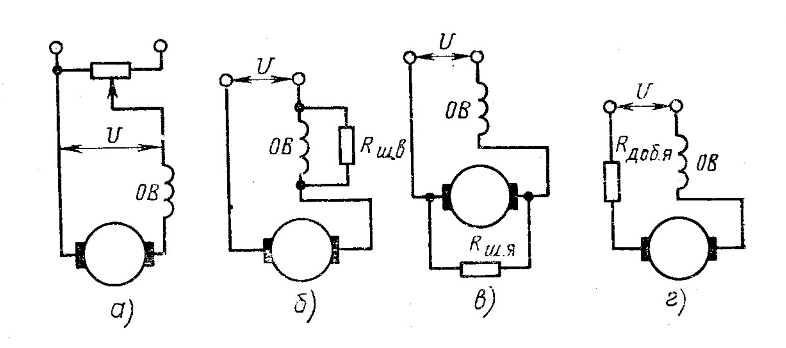


Рис. 7.5. Схемы регулирования частот вращения универсального коллекторного двигателя

соб шунтирования обмотки возбуждения. Изменение частоты вращения путем шунтирования обмотки якоря или включением добавочного сопротивления последовательно с якорем осуществляется просто, однако эти способы регулирования неэкономичны из-за электрических потерь в добавочных сопротивлениях. По этой же причине неэкономичен и способ регулирования частоты вращения изменением напряжения, подводимого к двигателю, если оно осуществляется с помощью реостата.

Более экономичным регулирование будет в том случае, когда вместо реостата используется автотрансформатор с плавным регулированием напряжения. При этом частоту вращения якоря можно как повышать, так и понижать по сравнению с номинальной. При шунтировании обмотки возбуждения достигается только повышение частоты вращения, а при шунтировании обмотки якоря и включении сопротивления последовательно с якорем частота вращения двигателя уменьшается по сравнению с номинальной. Изменять частоту вращения можно и сдвигом щеток с геометрической нейтрали против направления вращения якоря. На практике этим часто пользуются для достижения частоты вращения, возможно более близкой к заданной .

Объектом исследования является универсальный коллекторный двигатель, предназначенный для работы на переменном и постоян-

ном токе. Данные типичных УКД приведены в табл. 7.1. Цель работы — сравнение пусковых, рабочих и регулировочных характеристик УКД при его питании постоянным и переменным током.

Таблица 7.1

Тип двигателя	$P_н$, Вт	$U_н$, В	f, Гц	$n_н$, об/мин	$I_н$, А	η, %	$\cos\varphi$	G, кг
УМТ-11	5	=110 ~127	50	3 000	0,25 0,35	22—26	0,55—0,58	1,5
УМТ-12	10	=110 ~127	50	2 000	0,35 0,50	30—33	0,47—0,53	2,0
УМТ-21	25	=110 ~127	50	1 800	0,55 0,85	44—46 39—41	0,65—0,67	3,5
УМТ-22	55	=110 ~127	50	2 500	1,00 1,50	54—56 49—51	0,71—0,73	4,5
УЛ-02	10	=110 ~127 =220 ~220	50	8 000	0,27 0,26 0,14 0,15	34	0,90	0,4
УЛ-042	50	=110 ~127 =220 ~220	50	8 000	0,82 0,84 0,41 0,49	55	0,85	1,4
УЛ-061	180	=110 ~127 =220 ~220	50	8 000	2,64 2,68 1,30 1,60	62	0,85	3,7
УЛ-071	400	=110 ~127 =220 ~220	50	8 000	5,45 5,70 2,85 3,15	64	0,90	5,8
КВ-25	25	=110 ~127 =220 ~220	50	15 000	— 0,49 — 0,28	50	0,90	—
КУВ	370	=110 ~127 =220 ~220	50	15 000	— 4,80 — 2,80	68	0,94	—

ПРОГРАММА РАБОТЫ

А. Экспериментальные исследования

1. Снять рабочие характеристики двигателя n, P_S, I, P_R, η в зависимости от M при $U = U_н = \text{const}$ на постоянном токе.

2. Снять рабочие характеристики двигателя n, P_S, I, P_R, $\cos\varphi$, η в зависимости от M при $U = U_н = \text{const}$ на переменном токе.

3. Снять механические характеристики двигателя $n = f(M)$ при $U = U_н = \text{const}$ на переменном токе: а) при шунтировании обмотки якоря; б) при включении последовательно с якорем активного сопротивления; в) при шунтировании обмотки возбуждения.

4. Снять регулировочные характеристики двигателя $n = f(U)$ при $M = M_н = \text{const}$ и нормальной схеме (без внешних сопротивлений): а) на переменном токе; б) на постоянном токе.

5. Измерить пусковые моменты двигателя $M_к$ при $U = U_н$ на переменном и постоянном токе (схема нормальная).

Б. Расчеты и построения

1. Построить на одном графике рабочие характеристики двигателя при питании постоянным и переменным током.

2. Построить на одном графике механические характеристики двигателя $n = f(M)$ на переменном токе при различных добавочных сопротивлениях по п. 3 экспериментальной части.

3. Построить регулировочные характеристики двигателя $n = f(U)$ при $M = M_н = \text{const}$ по п. 4 экспериментальной части.

4. Определить отношение пускового момента $M_к$ к номинальному $M_н$ (кратность пускового момента $k_п = M_к / M_н$) на постоянном и переменном токе.

ПОЯСНЕНИЯ И УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

Прежде чем приступить к выполнению экспериментальной части работы, необходимо записать в протокол паспортные данные двигателя, нарисовать и изучить электрическую схему для проведения опытов и рассчитать номинальный полезный момент двигателя, (Н·м):

$$M_н = 9{,}55 P_{Rн} / n_н, \tag{7.4}$$

где $P_{Rн}$ — номинальная полезная мощность двигателя, Вт; $n_н$ — номинальная частота вращения якоря, об/мин.

Электрическая схема для проведения опытов изображена на рис. 7.6. При выполнении п. 1, 2, 4, 5 экспериментальной части используется схема без дополнительных сопротивлений. При выполнении п. 3 к нормальной схеме подключаются активные сопротивления $R_{ш.я}$, $R_{д.я}$, $R_{ш.в}$ соответственно п. 3а, 3б, 3в программы (для каждого опыта свое сопротивление).

Рекомендуется сначала все опыты провести на постоянном токе, а затем на переменном.

Рабочие характеристики. Сопротивления $R_{ш.я}$, $R_{д.я}$, $R_{ш.в}$ отключены. Измеряются подводимое к двигателю напряжение U, полез-

ный момент на валу M, частота вращения n, ток I, потребляемая двигателем из сети активная мощность P_S (при питании переменным током). Потребляемая двигателем мощность P_S при питании постоянным током, полезная мощность P_R, коэффициент полезного действия η находятся расчетным путем по известным формулам $P_S=UI$; $\eta=P_R/P_S$; $P_R=0{,}105Mn$.

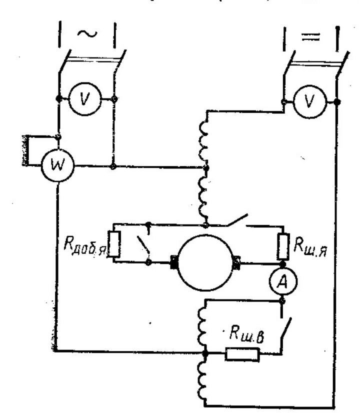


Рис. 7.6. Электрическая схема для снятия характеристик универсального коллекторного двигателя

Опытные и расчетные данные рекомендуется свести в таблицу.

Регулировочные характеристики. При питании переменным током подводимое к двигателю напряжение изменяется с помощью автотрансформатора (типа ЛАТР). При питании постоянным током напряжение изменяется с помощью реостата, включаемого по схеме потенциометра.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

В УКД стремятся получить примерно равные частоты вращения при номинальной полезной мощности на постоянном и переменном токе. Однако этого нельзя достичь, если используется одно и то же число витков обмотки возбуждения.

Действительно, при работе на постоянном токе в обмотке якоря наводится ЭДС вращения

$$E_{вр}=pnN\Phi/(60a). \qquad \textbf{(7.5)}$$

При работе на переменном токе ЭДС вращения может быть выражена формулой (7.5), однако в нее следует подставить мгновенное значение пульсирующего магнитного потока $\Phi=\Phi_m\sin(\omega t-\beta)$. В этом случае ЭДС изменяется с той же частотой, что и поток Φ. Действующее значение ЭДС вращения

$$E_{вр\sim}=pnN\Phi_m/(\sqrt{2}\,60a). \qquad (7.6)$$

Из сравнения формул (7.5) и (7.6) видно, что при равенстве частот вращения $E_{вр=}>E_{вр\sim}$, так как $\Phi>\Phi_m/\sqrt{2}$. Для соблюдения равенства потоков необходимо, чтобы при работе УКД на переменном токе к сети подключалось меньшее число витков обмотки возбуждения, чем при работе на постоянном токе. Это достигается использованием соответствующих отводов (см. рис. 7.4).

Рабочие характеристики УКД, представленные на рис. 7.7, качественно имеют один и тот же вид как на постоянном, так и на переменном токе. Однако на постоянном токе двигатель обладает большей перегрузочной способностью, более высоким КПД и име-

ет меньший ток при той же мощности. Ухудшение характеристик на переменном токе обусловлено прежде всего появлением сдвига по фазе между напряжением и током, потерями в стали статора, увеличением электрических потерь за счет появления реактивной составляющей тока.

К недостаткам двигателя, работающего на переменном токе, относится также и снижение его коэффициента мощности при уменьшении частоты вращения. Для объяснения этого явления рассмотрим векторную диаграмму УКД (рис. 7.8). Предположим, что

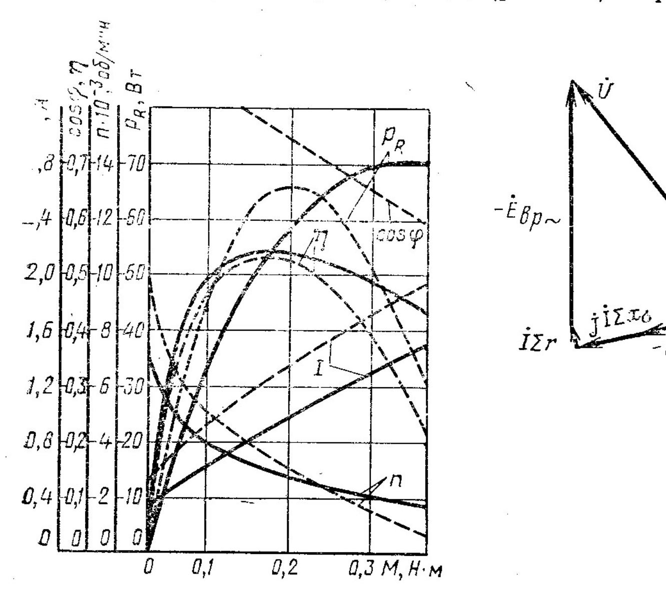


Рис. 7.7. Рабочие характеристики универсального коллекторного двигателя:
— — — — переменный ток; ———— постоянный ток

Рис. 7.8. Векторная диаграмма универсального коллекторного двигателя при работе от сети переменного тока

якорь двигателя вращается с постоянной частотой и что щетки установлены на геометрической нейтрали. Следовательно, ЭДС трансформации на щетках равна нулю. При прохождении тока I в двигателе возникнут два потока — поток полюса $\Phi_в$ и поток якоря $\Phi_я$, сдвинутые по фазе на угол β. При этом ЭДС вращения находится в противофазе с потоком $\Phi_в$, так как в режиме двигателя она противодействует прохождению тока. Уравнение ЭДС в цепи двигателя может быть записано в виде

$$\dot{U} - \dot{I}\sum r - j\dot{I}\sum x_\sigma = -\dot{E}_{вр\sim} - \dot{E}_я - \dot{E}_в, \qquad (7.7)$$

где $\dot{I}\Sigma r$ — падение напряжения на всех активных сопротивлениях электрической цепи двигателя (включая сопротивление щеточного контакта); $\dot{I}\Sigma x_\sigma$ — падение напряжения на индуктивных сопротив-

лениях рассеяния обмоток возбуждения и якоря; $\dot{E}_я$, $\dot{E}_в$ — трансформаторные ЭДС, наведенные в обмотках якоря и возбуждения.

Из диаграммы видно, что при возрастании частоты вращения увеличивается $E_{вр\sim}$ и уменьшается угол φ. Для получения более высоких значений $\cos\varphi$ необходимо, как следует из диаграммы, уменьшать индуктивности обмоток якоря и возбуждения. Для этого проектируют УКД с возможно меньшим зазором и, следовательно, меньшим числом витков обмотки возбуждения.

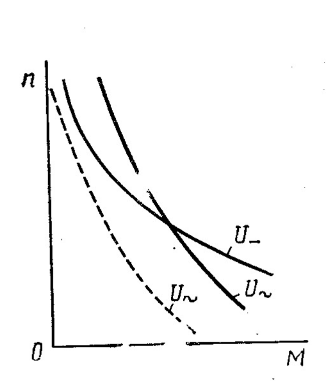


Рис. 7.9. Механические характеристики универсального коллекторного двигателя

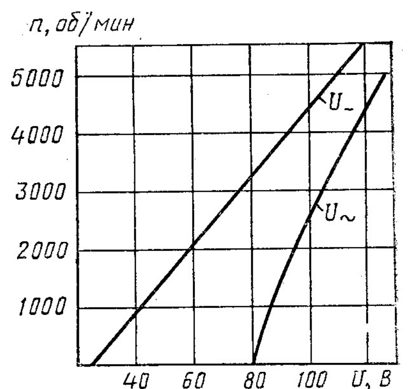


Рис. 7.10. Регулировочные характеристики УКД на постоянном (U_-) и переменном ($U\sim$) токе

Механические характеристики $n=f(M)$ пересекаются в точке, соответствующей номинальной полезной мощности. Если включать полное число витков обмотки возбуждения, то механическая характеристика на переменном токе сдвинется в сторону начала координат и примет вид кривой, изображенной штриховой линией (рис. 7.9). Это вызвано влиянием индуктивного сопротивления обмотки возбуждения.

Пусковой момент УКД при работе на постоянном токе значительно больше, чем на переменном. Уменьшение пускового момента на переменном токе объясняется прежде всего пульсацией потока и наличием сдвига по фазе между током и потоком. Кратность пускового тока в УКД достигает 5—7.

Регулировочные характеристики $n=f(U)$ при $M=\text{const}$ приведены на рис. 7.10. Регулировочные свойства УКД на постоянном токе лучше, так как та же частота вращения достигается при меньшем напряжении.

При шунтировании обмотки якоря частота вращения УКД, как отмечалось ранее, снижается. Это объясняется тем, что увеличивается ток УКД, проходящий по обмотке возбуждения. Растет поток, а скорость падает, так как она обратно пропорциональна потоку. Уменьшается частота вращения УКД и при включении последова-

тельно с якорем добавочного активного сопротивления, так как при этом уменьшается электромагнитная мощность за счет снижения напряжения на якоре. При шунтировании обмотки возбуждения частота вращения растет из-за уменьшения потока машины, вызванного снижением тока возбуждения.

Вопросы для самопроверки

1. Укажите особенности конструкции УКД.
2. Перечислите основные достоинства и недостатки УКД.
3. Как можно получить примерно одинаковые характеристики УКД при его работе на переменном и постоянном токе?
4. Назовите причины возникновения сдвига по фазе между током и потоком при работе УКД на переменном токе.
5. Чем различаются вращающие моменты УКД при работе на постоянном и переменном токе?
6. Постройте векторную диаграмму УКД при работе на переменном токе.
7. Проанализируйте векторную диаграмму ЭДС, действующих в коммутируемой секции УКД.
8. Запишите условие безыскровой коммутации УКД при его работе на переменном токе.
9. При каком режиме работы трансформаторная ЭДС в коммутируемой секции УКД достигает наибольшего значения?
10. Перечислите способы регулирования частоты вращения УКД.
11. Назовите наиболее экономичный способ регулирования частоты вращения УКД. Объясните его достоинства.
12. Можно ли регулировать частоту вращения УКД сдвигом щеток?

Раздел третий

ИСПЫТАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МИКРОМАШИН АВТОМАТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Глава 8
ИСПЫТАНИЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МИКРОДВИГАТЕЛЕЙ

§ 8.1. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Управляемые двухфазные асинхронные двигатели широко применяются в точных приборных и следящих системах, в счетно-решающих устройствах. Они используются и в качестве исполнительных двигателей (ИД) автоматических устройств промышленного назначения.

Назначение ИД — преобразование *электрического сигнала* (чаще всего напряжения управления) *в механическое перемещение вала.* Они выполняются мощностью от сотых долей ватта до нескольких сотен ватт как для стандартной (50 Гц), так и для повышенной (200, 400, 500 и 1000 Гц) частот при синхронной частоте вращения от 1500 до 30 000 об/мин. В зависимости от назначения и области применения к ИД предъявляются общие и специальные требования. К общим требованиям условно можно отнести: 1) наличие устойчивой механической характеристики, обеспечивающей плавное регулирование частоты вращения в широких пределах и большой пусковой момент; 2) работоспособность при заданных климатических условиях и механических нагрузках; 3) по возможности малые габариты и масса; 4) высокая надежность.

Особенно разнообразна группа специальных требований: 1) заданная нелинейность механической характеристики Δm и ее крутизна $k_{дв}=n_х/M_к$ — отношение частоты вращения в режиме холостого хода к пусковому моменту (наиболее жесткие требования по Δm предъявляют к ИД для точных приборных систем); 2) высокое быстродействие — малые значения электромеханической постоянной времени $T_м$, а иногда и малый момент инерции J; 3) большие кратность регулирования частоты вращения и диапазон линейного регулирования Δn; 4) отсутствие самохода при снятии сигнала; 5) высокая чувствительность — малое напряжение трогания $U_{у.трог}/U_{ун}$; 6) ограниченная мощность управления, и др.

Перечисленные требования большей частью противоречивы, и поэтому важно в каждом конкретном случае применения ИД выделить главные из них и добиться оптимального комплекса свойств [10, 12]. Чтобы обеспечить устойчивость механической характеристики, малую нелинейность Δm, способность двигателя к самоторможению (остановке при снятии сигнала), ротор необходимо вы-

полнить с большим активным сопротивлением. Критическое скольжение при этом будет $s_{макс}>1$ ($s_{макс}=2\div8$). Механическая характеристика $M=f(s)$ получается близкой к линейной. За номинальную полезную мощность $P_{Rн}$ принимается наибольшая полезная мощность, развиваемая при скольжении $s_н=0{,}5$. Относительное сопротивление взаимоиндукции $\xi_m=x_m/r_R$ — отношение индуктивного сопротивления, соответствующего главному потоку в воздушном зазоре, и активного сопротивления ротора, приведенного к обмоточным данным фазы статора $\xi_m=0{,}2\div2{,}0$. Благоприятным с точки

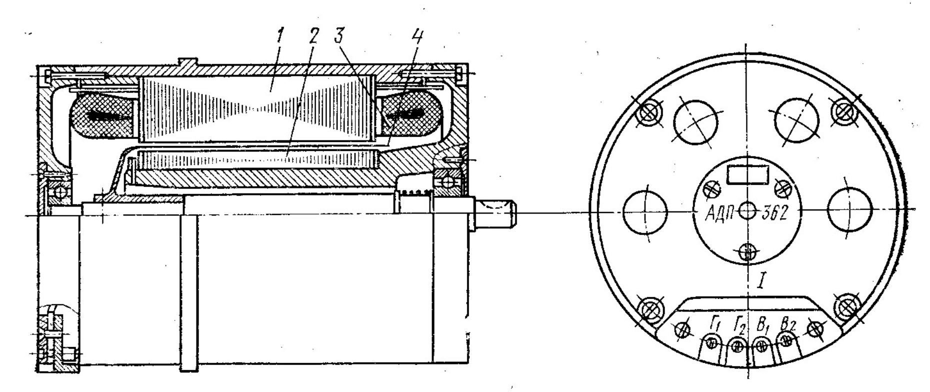


Рис. 8.1. Конструкция двигателя с полым немагнитным ротором серии АДП:
1 — внешний статор; *2* — внутренний статор; *3* — обмотки статора; *4* — полый ротор

зрения линейности механической и регулировочной характеристик является малое относительное активное сопротивление обмотки статора $\rho_S=r_S/r_R$. Для двигателей мощностью от долей ватта до 60 Вт $\rho_S=0{,}04\div0{,}4$; большие значения относятся к двигателям меньшей мощности.

Ротор исполнительного двигателя выполняется в виде полого цилиндра из немагнитного материала — ИДП или в виде беличьей клетки — ИДК, реже делается полый или сплошной ферромагнитный ротор с немагнитным покрытием или без него. На рис. 8.1 показано устройство исполнительного двигателя с полым немагнитным ротором серии АДП.

Двигатель имеет два статора, двухфазную распределенную обмотку и ротор, выполненный в виде полого цилиндра. Внешний и внутренний статоры набираются из листов электротехнической стали или пермаллоя. Внутренний статор служит для уменьшения сопротивления потоку, проходящему через воздушный зазор. Обмотка статора чаще всего выполняется в виде двух раздельных обмоток: возбуждения (В) и управления (У). Обычно обе обмотки располагаются на внешнем статоре. У ИД полезной мощностью менее 1 Вт для уменьшения размеров машины и удобства выполнения обмотки располагаются на внутреннем статоре, а у двигателей большей мощности (более 100 Вт) — на внешнем и внутреннем статорах.

Исполнительный двигатель с короткозамкнутым ротором типа «беличья клетка» сквозной конструкции серии ДКИ приведен на рис. 8.2. Его статор *1* принципиально не отличается от внешнего статора ИДП (рис. 8.1). Большим достоинством двигателей серии ДКИ является то, что при механической обработке расточка статора и подшипниковых крышек под внешнее кольцо подшипника выполняется за один проход, что позволяет сделать малый воздушный зазор $\delta=0{,}03\div0{,}05$ мм. Из сравнения ИДП с ИДК следует, что достоинствами ИДП являются: малый момент инерции J, что достигается выполнением ротора тонкостенным (толщина цилиндра $\Delta=0{,}1\div0{,}8$ мм) из немагнитного материала с малой плотностью (алюминия и его сплавов); высокая чувствительность (работа от малого сигнала), обусловленная небольшой массой ротора и отсутствием реактивного момента, появляющегося у ИДК из-за двусторонней зубчатости; плавный и бесшумный ход из-за отсутствия высших зубцовых гармонических в кривой поля.

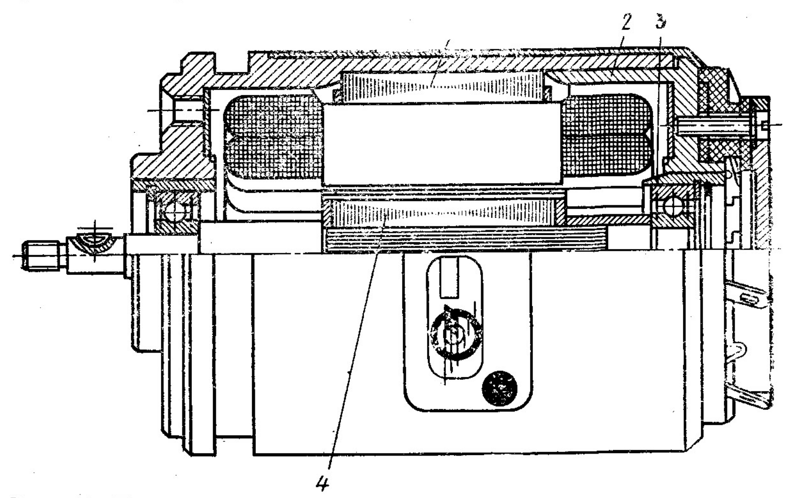


Рис. 8.2. Двигатель серии ДКИ сквозной конструкции с ротором типа «беличья клетка»:

1 — статор; *2* — подшипниковая крышка; *3* — наружное кольцо подшипника; *4* — ротор

Главный недостаток ИДП — большой суммарный воздушный зазор $\Sigma\delta=\delta_1+\Delta+\delta_2=0{,}6\div1{,}3$ мм, который увеличивает намагничивающий ток, ухудшает КПД и увеличивает массогабаритные показатели машины. Из-за консольного крепления ротора ИДП менее надежен в условиях вибрации и тряски.

Преимущества ИДК — большая устойчивость к термическим и механическим воздействиям, лучшее использование, особенно при малых полезных мощностях из-за небольшого воздушного зазора при сквозной конструкции машины. Для полезных мощностей от долей до нескольких ватт ИДК имеет наилучшие массогабаритные и динамические показатели, а при $P_{Rн}>5$ Вт ИДП превосходит

Таблица 8.1

	Тип исполнительного двигателя	$M_к \cdot 10^{-4}$, Н·м	$\frac{f_1}{2p}$, Гц	$P_{Rн}$, Вт	$\frac{n_х}{n_н}$, об/мин	$\frac{U_с}{U_у}$, В	$C_р$, мкФ	$T_м$, мс	$J \cdot 10^{-7}$, кг·м²	Δm, %	η, %	$U_{трог}$, %	$\frac{G}{P_{Rн}}$, кг/кВт	ξ_m	ρ_S	$s_{макс}$	Схема включения
С полным немагнитным ротором	АДП-262	882,6	50/2	9,5	2650/1850	110/125	2,50	5	16,7	25,4	19,2	1,60	162	0,570	0,120	8,20	С конденсатором в обмотке возбуждения
	АДП-263А	588,0	500/6	27,8	8600/6000	36/275	3,90	27	16,7	36,6	27,0	0,36	65	0,710	0,070	3,00	То же
	ДИД-5ТА	216,0	400/6	5,0	6000/4050	36/30	—	75	24,5	20,7	20,0	1,67	144	1,280	0,190	3,38	Сдвиг схемой
	ДИД-1ТА	15,4	400/2	1,0	18 000/11 800	36/30	—	80	0,78	16,8	18,0	1,67	110	1,190	0,340	3,11	То же
С ротором типа «беличья клетка»	ДМ-1	39,3	400/6	1,0	5500/3500	36/30	—	26	1,67	17,0	20,0	3,33	150	1,470*	0,211*	2,12	»
	ДКИ-1-12ТВ	30,4	400/4	1,0	8600/5900	115/36	0,15	18	0,59	26,6	12,5	5,55	100	1,330*	0,440*	1,95	С конденсатором в обмотке возбуждения
	ДКИ-16-12ТВ	295,0	400/4	16,0	10 000/6 690	115/80	0,47	72	20,1	31,9	43	2,50	47	—	—	—	То же
	АД-50	206,0	400/8	3,5	5000/2700	40/40	—	16	5,88	11,0	20,0	2,50	128	0,783*	0,061*	3,04	Сдвиг схемой

* Для двигателей типа «беличья клетка» приведены параметры ξ'_m и ρ'_S преобразованной схемы замещения, в которой намагничивающий контур перенесен за сопротивление рассеяния обмотки ротора.

ИДК почти по всем показателям, кроме устойчивости к термическим и механическим воздействиям.

В табл. 8.1 в качестве примера приведены данные исполнительных двигателей нескольких серий с различными типами роторов, включая относительные параметры схемы замещения $\xi_m = x_{my}/r_{Ry}$ и $\rho_S = r_{Sy}/r_{Ry}$. За базовое сопротивление принято активное сопротивление ротора r_{Ry}, приведенное к обмоточным данным фазы управления. Главным параметром является относительное сопротивление взаимоиндукции ξ_m, оно характеризует отношение электромагнитной мощности, передаваемой на ротор, к мощности, подведенной от сети.

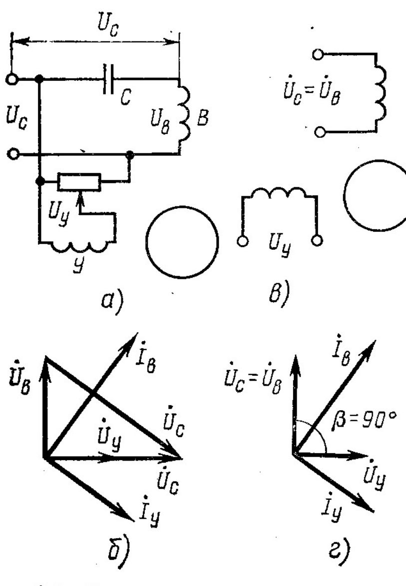


Рис. 8.3. Схемы включения и векторные диаграммы ИД при сдвиге конденсатором и схемой

У *идеального* двигателя вся подводимая энергия передается на ротор, $x_{my} = \infty$, r_{Ry} значительно больше всех других сопротивлений обмоток ($r_{Sy} = x_{Sy} = x_{Ry} = 0$) и потери в стали отсутствуют [10]. В реальном ИДП сопротивление рассеяния полого ротора мало [$x_{Ry} = (0,05 \div 0,1) r_{Ry}$] и может не учитываться.

Использование для ИДК преобразованной схемы замещения, где сопротивления рассеяния обмоток статора и ротора объединены, позволяет все результаты исследования для ИДП распространить и на ИДК [10]. В общем случае поле в любом типе ИД эллиптическое и вращающий момент равен разности моментов от прямого и обратного полей: $M = M_1 - M_2$.

Для создания вращающегося поля кроме пространственного сдвига статорных обмоток необходим временной сдвиг напряжений и токов в обмотках возбуждения и управления. Этот сдвиг может быть достигнут с помощью конденсатора при однофазном питании ИД (рис. 8.3, *а, б*) или с помощью схемы (рис. 8.3, *в, г*), которая чаще всего обеспечивает постоянный временной сдвиг на угол $\beta = 90°$. В ИД с конденсатором в обмотке возбуждения временной сдвиг $\beta = 90°$ соответствует обычно скольжению $s = 1$, для других же скольжений он отличается от 90°. На обмотку возбуждения двигателя подается постоянное напряжение сети $U_c = \text{const}$, на обмотку управления — переменное напряжение сигнала $U_y = \text{var}$.

Отношение действующих значений напряжения управления и напряжения сети называется *коэффициентом сигнала* $\alpha = U_y/U_c$. Целесообразно ввести понятие эффективного коэффициента сигнала α_e, равного отношению напряжений управления и сети, приве-

денных к обмоточным данным одной из фаз статора, так как от его значения зависит характер поля в машине.

Для ИД с конденсатором в обмотке возбуждения $\alpha_e = U_у/U_c' = \alpha k$, $U_c' = U_c/k$, где $k = w_{в.эф}/w_{у.эф}$ — отношение эффективных чисел витков обмоток возбуждения и управления.

Чтобы получить круговое поле в машине, необходимо обеспечить равенство МДС обмоток статора $I_в w_{в.эф} = I_у w_{у.эф}$ и сдвиг по фазе между ними 90°. При этом для любой схемы включения двигателя в сеть приведенные значения напряжений на обмотках должны быть практически одинаковыми: $U_у = U_в' = U_в/k$. При включении двигателя в однофазную сеть (рис. 8.3, *а, б*) напряжение сети U_c складывается из напряжений на обмотке возбуждения $U_в$ и конденсаторе U_C. При круговом поле в режиме пуска и номинальных напряжениях питания отношение приведенных напряжений на обмотках статора $U_{ун}/U'_{вк} = U_{ун}k/U_{вк} = 1$, коэффициент сигнала $\alpha_0 = U_{ун}/U_{с.н}$, а эффективный коэффициент сигнала $\alpha_{e0} = U_{у.н}/U_{с.н} = \alpha_0 k$, индекс «0» принят для кругового поля. При питании двигателя от двухфазной сети (рис. 8.3, *в, г*) напряжения сети и обмотки возбуждения совпадают: $U_c = U_в$, коэффициент сигнала $\alpha = U_у/U_в$, а эффективный коэффициент сигнала $\alpha_e = U_у/U'_в = \alpha k$. В этом случае круговое поле в машине образуется при $\alpha_e = 1$. Для одинаковых обмоток статора напряжения возбуждения и управления должны быть равными $U_в = U_у$; если $k \neq 1$, то $U_у = U_в/k$. У конденсаторного ИД при соответствующих эффективном коэффициенте сигнала α_{e0} и емкости C_0 круговое поле будет только для одного значения скольжения (обычно при пуске $s = 1$). В случае двухфазного питания при $\alpha_e = 1$ и электрическом угле $\beta = 90°$ оно сохранится на всем диапазоне скольжений двигателя $s = 0 \div 1$. При круговом поле в режиме пуска один и тот же двигатель, включенный в однофазную (с конденсатором в обмотке возбуждения) или двухфазную сеть, имеет одинаковый пусковой момент, так как напряжения на обмотках статора равны между собой ($U_{в.к} = U_{в.н}$ на обмотке возбуждения, $U_{у.н}$ — на обмотке управления) и сдвинуты во времени на 90°.

Наибольшее распространение получило управление изменением амплитуды управляющего напряжения, т. е. коэффициента сигнала. С изменением сигнала управления меняется степень эллиптичности поля, а следовательно, и частота вращения двигателя.

Методика расчета характеристик ИД и подробный анализ его свойств приведены в [10, 12].

Цель исследования — изучение свойств исполнительных двигателей при различных схемах включения и амплитудном управлении, снятие и анализ рабочих и регулировочных характеристик, а также сравнение свойств реального и идеального двигателей.

Объектом исследования могут служить асинхронные двигатели промышленной частоты с полым немагнитным ротором типа АДП, И6762..., ИД и с ротором типа «беличья клетка» — ДКИ, 2АСМ, АДК и др.

ПРОГРАММА ИССЛЕДОВАНИЙ

А. Экспериментальные исследования

1. Ознакомиться с конструкцией ИД и его паспортными данными.

2. Проверить отсутствие технологического и методического самоходов. Определить напряжение трогания $U_{\text{у.трог}}$ и момент трения $M_{\text{тр}}$.

3. Определить сопротивления фаз статора при коротком замыкании и коэффициент трансформации. Рассчитать с помощью ЭВМ коэффициент сигнала α_{e0}, емкости C_0 и C_m и пусковые моменты $M_{\text{к}0}$ и $M_{\text{к}m}$ для ИД с конденсатором.

4. Снять зависимость пускового момента: а) от напряжения управления $M_{\text{к}}=f(U_{\text{у}})$; б) от емкости $M_{\text{к}}=f(C)$ при $U_{\text{с}}=\text{const}$, $U_{\text{у}}=\text{const}$.

5. Снять характеристики для ИД с конденсатором в цепи возбуждения: а) рабочие $I_{\text{в}}$, $I_{\text{у}}$, $P_{\text{в}}$, $P_{\text{у}}$, P_R, M, $\cos\varphi_{\text{в}}$, $\cos\varphi_{\text{у}}$, η в зависимости от n при двух значениях эффективного коэффициента сигнала: $\alpha_{e0}(U_{\text{с}}=U_{\text{с.н}};\ U_{\text{у}}=U_{\text{у.н}})$ и $0{,}5\alpha_{e0}(U_{\text{с}}=U_{\text{с.н}};\ U_{\text{у}}=0{,}5U_{\text{у.н}})$ в диапазоне частот вращения от $n=n_{\text{х}}$ (при холостом ходе) до $n=0$ при пуске; б) регулировочные n, $I_{\text{в}}$, $I_{\text{у}}$, $P_{\text{в}}$, $P_{\text{у}}$, $\cos\varphi_{\text{в}}$, $\cos\varphi_{\text{у}}$, P_R в зависимости от $U_{\text{у}}$ при $M=\text{const}$ для $M=0$ и $M=0{,}5M_{\text{к}0}$.

6. Снять характеристики для ИД при питании от двухфазной сети (сдвиг схемой): а) рабочие $I_{\text{в}}$, $I_{\text{у}}$, $P_{\text{в}}$, $P_{\text{у}}$, P_R, M, $\cos\varphi_{\text{в}}$, $\cos\varphi_{\text{у}}$, η в зависимости от n при двух значениях эффективного коэффициента сигнала: $\alpha_e=1$ (напряжение на обмотке возбуждения то же, что и у ИД с конденсатором при пуске $U_{\text{в}}=U_{\text{в.к}}$, $U_{\text{у}}=U_{\text{у.н}}$) и $\alpha_e=0{,}5(U_{\text{в}}=U_{\text{в.к}};\ U_{\text{у}}=0{,}5U_{\text{у.н}})$; б) регулировочные n, $I_{\text{в}}$, $I_{\text{у}}$, $P_{\text{в}}$, $P_{\text{у}}$, $\cos\varphi_{\text{в}}$, $\cos\varphi_{\text{у}}$, P_R в зависимости от $U_{\text{у}}$ при $M=\text{const}$ для $M=0$ и $M=0{,}5M_{\text{к}0}$.

Б. Расчеты и построения

На основании результатов экспериментального исследования:

1. Вычертить эскиз исполнительного двигателя. При этом пользоваться стендом с деталями двигателей.

2. Построить зависимости пускового момента $M_{\text{к}}=f(U_{\text{у}})$ и $M_{\text{к}}=f(C)$.

3. Построить на одном графике механические характеристики в относительных единицах $m=f(\nu)$: а) при сдвиге конденсатором для α_0 и $0{,}5\alpha_0$; б) при сдвиге схемой для $\alpha_e=1$ и $\alpha_e=0{,}5$.

4. Построить зависимости $P_R=f(n)$, $P_{\text{в}}=f(n)$, $P_{\text{у}}=f(n)$, $U_{\text{в}}=f(n)$ в абсолютных единицах: а) при сдвиге конденсатором для α_0; б) при сдвиге схемой для $\alpha_e=1$.

5. Построить на одном графике регулировочные характеристики в относительных единицах: $\nu=f(\alpha)$ при $M=\text{const}$ для $M=0$ и $M=0{,}5M_{\text{к}0}$: а) при сдвиге конденсатором; б) при сдвиге схемой.

6. Оценить свойства двигателя при разных схемах включения, заполнив таблицу сравнения.

ПОЯСНЕНИЯ И УКАЗАНИЯ

Перед началом испытаний следует ознакомиться с номинальными данными двигателя $P_{кн}$, $U_{ск}$, $U_{ун}$, $n_н$, а также внимательно изучить схему стенда.

Все испытания двигателя проводятся на стенде, схема которого изображена на рис. 8.4, *а*. На этой схеме, а также на стенде все элементы, относящиеся к обмотке возбуждения, имеют индекс «в», в обмотке управления — индекс «у».

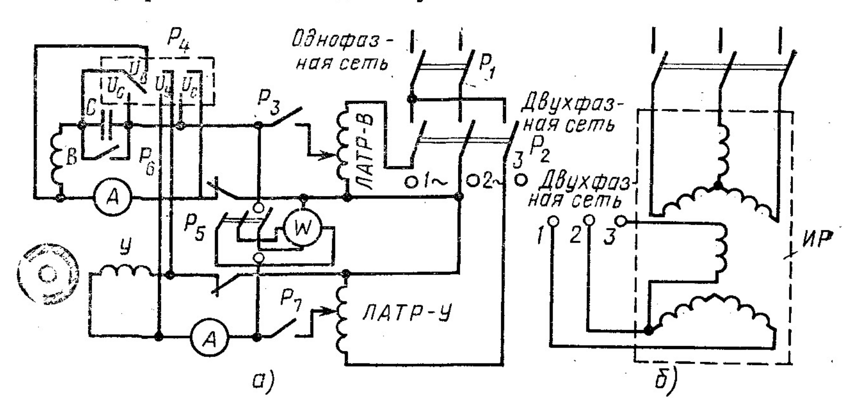


Рис. 8.4. Схема стенда для испытания двигателя с полым ротором и схема включения индукционного регулятора для получения двухфазного тока

Схема позволяет производить испытание двигателя при однофазном питании обмотки управления (при разомкнутом рубильнике P_3), а также при питании двух обмоток; в этом случае двигатель может работать:

а) при временно́м сдвиге, создаваемом конденсатором (питание обеих фаз от однофазной сети);

б) при временно́м сдвиге, создаваемом схемой (сдвиг в 90° создается индукционным регулятором *ИР*, включенным по специальной схеме на рис. 8.4, *б*).

При временно́м сдвиге, создаваемом конденсатором, включаются рубильники P_1, P_3, рубильник P_2 включается в верхнее положение на сеть. При временно́м сдвиге, создаваемом схемой, включаются рубильники P_1, P_3, P_6 (замыкается накоротко конденсатор), рубильник P_2 включается в нижнее положение — на индукционный регулятор, у которого во вторичной обмотке две фазы соединены последовательно и сдвинуты на 90° по отношению к третьей фазе.

На обмотку возбуждения подается неизменное по амплитуде напряжение от лабораторного трансформатора (*ЛАТР—В*), на обмотке управления напряжение регулируется лабораторным трансформатором (*ЛАТР—У*) или потенциометром. Токи измеряются амперметрами, включенными в цепь обмотки управления и возбуждения; напряжения — вольтметром, соединенным с вилкой и штепсельной колодкой P_4, на которую поданы напряжения: сети U_c,

обмотки управления $U_{у}$, обмотки возбуждения $U_{в}$, конденсатора U_C; мощности в цепи возбуждения и управления — ваттметром с переключателем P_5. Все приборы, установленные в схеме, должны иметь малое собственное потребление.

Проверка отсутствия самохода. Определение напряжения трогания и момента трения. Различают два вида самохода: технологический и методический [10]. Для проверки отсутствия технологического самохода, обусловленного наличием короткозамкнутых витков в обмотке статора, асимметрией магнитной цепи или замыканием отдельных листов пакета статора, необходимо включить в сеть только обмотку возбуждения (рубильник P_7 на схеме рис. 8.4, *а* разомкнут) и убедиться, что ротор двигателя неподвижен.

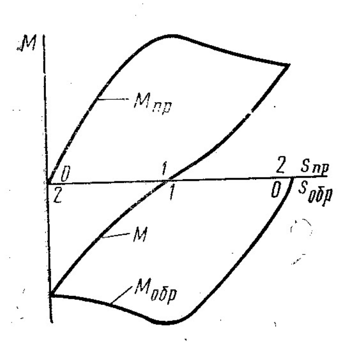


Рис. 8.5. Зависимость вращающего момента от скольжения при однофазном включении и большом активном сопротивлении ротора

Если активное сопротивление ротора достаточно велико, то, как видно из рис. 8.5, машина при однофазном питании обладает свойством самоторможения и ее результирующий момент отрицательный. При снятии сигнала в этом случае методический самоход отсутствует. Чтобы в этом убедиться, надо сначала включить в сеть обе обмотки статора, подавая на них номинальное напряжение, а затем снять напряжение управления, размыкая рубильник P_7, при этом двигатель должен остановиться.

Чтобы найти напряжение трогания $U_{у.трог}$, надо измерить минимальное напряжение управления при номинальном напряжении сети и отсутствии нагрузки на валу двигателя, при котором двигатель начинает вращаться. Напряжение $U_{у.трог}$ измеряется при сдвиге, создаваемом схемой. Момент трения находится путем простого пересчета, при этом измеряется начальный пусковой момент для данной схемы включения двигателя при номинальных напряжениях $U_{в.н}$ и $U_{у.н}$ с помощью электромагнитного тормоза:

$$M_{тр}=M_{к0}U_{у.трог}/U_{у.н}. \qquad (8.1)$$

Определение сопротивлений фаз статора и коэффициента трансформации при коротком замыкании. Расчет величин α_{e0}, C_0, $C_{макс}$ и пусковых моментов $M_к$ и $M_{к.макс}$. Полные сопротивления фаз статора определяются при неподвижном роторе и питании каждой из обмоток в отдельности. Измеряются напряжение $U_{у.к}(U_{в.к})$, ток $I_{у.к}(I_{в.к})$ и потребляемая мощность $P_{у.к}(P_{в.к})$. Сопротивления находятся при номинальных напряжениях для фаз управления и возбуждения:

$$z_{у.к}=U_{у.к}/I_{у.к};\ r_{у.к}=P_{у.к}/I^2_{у.к};\ x_{у.к}=\sqrt{z^2_{у.к}-r^2_{у.к}}; \qquad (8.2)$$

$$z_{в.к}=U_{в.к}/I_{в.к};\ r_{в.к}=P_{в.к}/I^2_{в.к};\ x_{в.к}=\sqrt{z^2_{в.к}-r^2_{в.к}}. \qquad (8.3)$$

Коэффициент трансформации определяется по формуле

$$k=\sqrt{x_{в.к}/x_{у.к}}. \quad (8.4)$$

Эффективный коэффициент сигнала ИД с конденсатором для получения кругового поля при пуске рассчитывается по формуле

$$\alpha_{eэ}=\alpha_e k=x_{у.к}/r_{у.к}. \quad (8.5)$$

В этом случае реактивное сопротивление (Ом) и емкость конденсатора (мкФ) таковы:

$$x_{C_0}=k^2z^2_{у.к}/x_{у.к};\ C_0=10^6/(2\pi f x_{C_0}). \quad (8.6)$$

Реактивное сопротивление (Ом) и емкость конденсатора (мкФ), при которых пусковой момент будет максимальным, таковы:

$$x_{C\,макс}=k^2z_{у.к};\ C_{макс}=10^6/(2\pi f x_{C\,макс}). \quad (8.7)$$

Пусковой момент в ИД с конденсатором при круговом поле

$$M_{к0}=2I^2_{у.к}r'_{R\,у.к}/\Omega_c, \quad (8.8)$$

где $r'_{R\,у.к}=r_{у.к}-r_{S\,у}$, $r_{S\,у}$ — активное сопротивление обмотки управления; $\Omega_c=2\pi f/p$.

В ИД с конденсатором максимальный пусковой момент

$$M_{к.макс}=I^2_{у.к}r'_{R\,у.к}\left(\sqrt{1+\alpha^2_{e0}}+\alpha_{e0}\right)/(\alpha_{e0}\Omega_c). \quad (8.9)$$

В (8.8) и (8.9) $I_{у.к}$ — ток обмотки управления при пуске для $U_у=U_{у.н}$.

Пусковой момент двигателя. Зависимость пускового момента двигателя от напряжения управления одинакова для любой из рассматриваемых схем включения, поэтому она снимается только при сдвиге напряжений схемой. К обмотке возбуждения подводится номинальное напряжение $U_в=U_{в.н}=\text{const}$, а напряжение управления изменяется от $U_{у.трог}$ до $U_{у.н}$. По шкале электромагнитного тормоза измеряется начальный пусковой момент. Практически зависимость $M_к=f(U_у)$ линейна. В конденсаторном ИД пусковой момент зависит еще и от значения емкости. Кривая $M_к=f(C)$, приведенная на рис. 8.6, снимается при номинальных напряжениях $U_{с.н}$ и $U_{у.н}$ и изменении емкости от $C_{мин}$ до $C>C_{макс}$. Минимальное значение емкости выбирается так, чтобы обеспечить достаточную точность измерения используемым тормозом. Следует также измерить пусковые моменты для $C=C_0$ и $C=C_{макс}$ и рассчитать их по формулам (8.6), (8.7). Все измерения надо производить быстро во избежание чрезмерного перегревания обмотки.

Рабочие характеристики при различных схемах включения двигателя. Рабочие характеристики исследуются для двух схем включения ИД.

П р и в р е м е н н о́ м с д в и г е, с о з д а в а е м о м к о н д е н с а т о р о м (см. рис. 8.3, *а, б*), рабочие характеристики $I_в$, $I_у$, $P_в$, $P_у$, M, $\cos\varphi_в$, $\cos\varphi_у$, η в зависимости от n снимаются при постоянном

коэффициенте сигнала, т. е. постоянном приложенном напряжении $U_с$=const и $U_у$=const для двух коэффициентов сигнала: α_0 и $0{,}5\alpha_0$.

Испытуемый ИД с конденсатором рассчитан так, что круговое поле в машине получается при пуске и номинальных напряжениях. Поэтому $\alpha_0=U_{у.н}/U_{с.н}$, а значения напряжения $U_{у.н}$, $U_{с.н}$ и емкости C_0 принимаются по паспортным данным машины. Для уменьшения коэффициента сигнала вдвое, т. е. получения $0{,}5\alpha_0$, уменьшают вдвое напряжение управления, оставляя неизменным напряжение сети. При снятии рабочих характеристик изменяется нагрузочный момент двигателя от $M=0$ (при холостом ходе) до $M=M_к$ (при остановке двигателя, где $M_к$ — начальный пусковой момент).

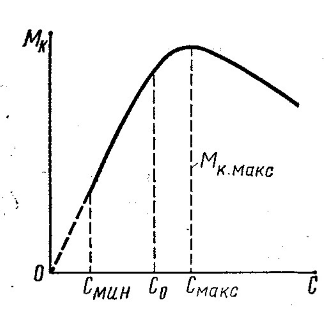


Рис. 8.6. Зависимость пускового момента от емкости

Вращающий момент измеряется с помощью электромагнитного тормоза [18]; начальный пусковой момент измеряется при заторможенном роторе (при механическом сцеплении тормозного диска с подвижной системой электромагнитов) по отклонению стрелки тормоза. Скорость рекомендуется измерять стробоскопом.

При снятии рабочих характеристик измеряются напряжения $U_с$, $U_в$, $U_у$, подводимые к двигателю, напряжение на конденсаторе U_C (В) в схеме с конденсатором; фазные токи $I_у$(А), $I_в$(А); мощности $P_у$ (Вт), $P_в$ (Вт); вращающий момент на валу M (Н·м); частота вращения n (об/мин).

По данным измерений рассчитываются коэффициенты мощности $\cos\varphi_у$ и $\cos\varphi_в$, полезная P_R и потребляемая P_S мощности (Вт), КПД:

$$\cos\varphi_в=P_в/(U_в I_в);\quad \cos\varphi_у=P_у/(U_у I_у); \tag{8.10}$$

$$P_R=0{,}105Mn; \tag{8.11}$$

$$P_S=P_в+P_у; \tag{8.12}$$

$$\eta=P_R/P_S. \tag{8.13}$$

Результаты измерений и расчетов следует свести в таблицу.

При временнóм сдвиге, создаваемом схемой (см. рис. 8.3, *г*), рабочие характеристики те же, что и при временнóм сдвиге, создаваемом конденсатором, и снимаются для двух коэффициентов сигнала: $\alpha_e=1$ и $\alpha_e=0{,}5$. Эффективный коэффициент сигнала $\alpha_e=1$ получается при $U_в=kU_у$. Напряжение управления принимается равным номинальному значению $U_у=U_{у.н}$ (таким же, как у конденсаторного двигателя).

Если коэффициент трансформации обмоток k неизвестен, то значение напряжения на обмотке возбуждения принимается по данным измерения $U_в=U_{в.к}$ для пускового режима при $\alpha=\alpha_0$ конден-

саторного двигателя ($U_c = U_{c.н}$ и $C = C_0$), так как в этом режиме имеет место круговое поле.

Запись результатов измерений и расчетов рекомендуется свести в таблицу. Расчетные величины определяются по формулам (8.10)—(8.13).

Регулировочные характеристики. Регулировочные характеристики двигателя n, $I_ь$, $I_у$, $P_в$, $P_у$, $\cos\varphi_в$, $\cos\varphi_у$, P_R в зависимости от напряжения управления $U_у$ снимаются при двух постоянных значениях моментов: $M=0$ (при холостом ходе) и $M=0{,}5M_{к0}$ (где $M_{к0}$ — начальный пусковой момент при круговом вращающемся поле) — для обеих схем включения ИД. Запись результатов измерений и расчета рекомендуется свести в таблицу. Коэффициент мощности и полезная мощность рассчитываются по формулам (8.10) и (8.11).

Для снятия регулировочных характеристик все величины следует измерять при изменении напряжения управления от минимального значения (напряжения трогания) до номинального при постоянном напряжении сети.

Для ИД с конденсатором регулировочная характеристика строится в координатах $\nu = f(\alpha_e/\alpha_{e0})$.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

По данным опытов на одном графике (рис. 8.7) строятся все механические характеристики в относительных единицах $m = f(\nu)$.

Для определения относительного значения момента $m = M/M_{к0}$ измеренный момент делят на начальный пусковой момент $M_{к0}$ при

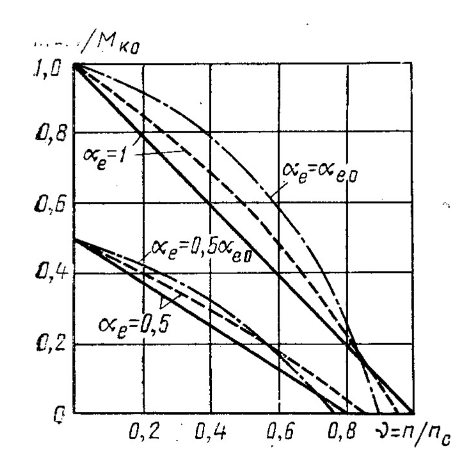


Рис. 8.7. Механические характеристики идеального и реального двигателей $m = f(\nu)$ при $\alpha_e = \text{const}$:

———— идеальный ИД;
— — — — ИД при сдвиге схемой;
—·—·—·— ИД при сдвиге конденсатором

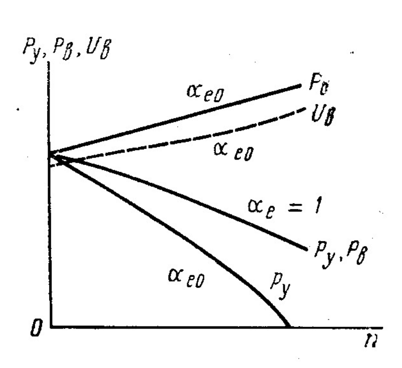


Рис. 8.8. Зависимость мощностей возбуждения $P_в = f(n)$, управления $P_у = f(n)$ и напряжения на обмотке возбуждения $U_в = f(n)$ от частоты вращения при $\alpha_e = \text{const}$

круговом вращающемся поле, найденный при заторможенном роторе ($\nu=0$). Относительная частота вращения вычисляется как $\nu=n/n_c$, где n и n_c — измеренная и синхронная частоты вращения.

На том же графике (рис. 8.7) наносится для сравнения механическая характеристика идеального двигателя, построенная по уравнению [10, 11]

$$m=\alpha_e-\left(1+\alpha_e^2\right)\nu/2 \qquad (8.14)$$

при сдвиге, осуществляемом схемой для $\alpha_e=1$ и $\alpha_e=0{,}5$.

Для любого коэффициента сигнала у идеального двигателя, как это следует из формулы (8.14), механическая характеристика линейна, причем с ростом скорости момент убывает. При изменении коэффициента сигнала меняется наклон механической характеристики. При снижении коэффициента сигнала вращающий момент уменьшается, так как увеличивается эллиптичность поля и растет тормозной момент от обратновращающегося поля.

Синхронная частота вращения при холостом ходе * имеет место только при круговом поле ($\alpha_e=1$), для других коэффициентов сигнала частота вращения при холостом ходе (при $m=0$)

$$\nu_x=2\alpha_e/(1+\alpha_e^2). \qquad (8.15)$$

При $\alpha_e=0{,}5$ значение $\nu_x=0{,}8$. Снижение частоты вращения при холостом ходе с уменьшением коэффициента сигнала объясняется действием обратновращающегося поля. При пуске в ход ($\nu=0$) вращающий момент у идеального двигателя изменяется пропорционально коэффициенту сигнала. В относительных единицах он численно равен коэффициенту сигнала:

$$m_{\nu=0}=m_к=\alpha_e. \qquad (8.16)$$

Механические характеристики реального двигателя нелинейны, но близки к линейным. Относительно большой вращающий момент при одинаковых частотах вращения (кроме частот вращения, близких к синхронным) образуется у конденсаторных двигателей, что объясняется увеличением напряжения на обмотке возбуждения с ростом частоты вращения (рис. 8.8).

У ИД с конденсатором круговое вращающееся поле возникает только при пуске для коэффициента сигнала α_0, в режиме холостого хода поле становится эллиптическим и сильное влияние начинает оказывать обратное поле. Поэтому ИД с конденсатором имеет меньшую частоту вращения холостого хода по сравнению с ИД при сдвиге схемой.

В качестве критерия для оценки нелинейности механической характеристики выбирается наибольшее отклонение характеристики $m=f(\nu)$ от прямой, проходящей через точки холостого хода ν_x и пуска $\nu=0$. Нелинейность механической характеристики обозначается Δm и находится с помощью построения, показанного на рис.

* Без учета механических потерь.

8.9. Проводится прямая AB, параллельная линии, соединяющей точки кривой момента при $\nu=0$ и $\nu=\nu_x$, и являющаяся касательной к механической характеристике: нелинейность $\Delta m=AC=BD$, а соответствующая ей относительная частота вращения $\nu_{\Delta m}=BE$. Нелинейность оценивается в долевых единицах или процентах. Относительная частота вращения $\nu_{\Delta m}$ практически равна 0,5. Если известна величина Δm, то по ней с достаточной точностью можно найти и кривую $m=f(\nu)$. Например, для сдвига схемой при круговом поле ($\alpha_e=1$) уравнение механической характеристики в первом приближении можно записать в виде [10]

$$m=1+(4\Delta m-1)\nu-4\Delta m\nu^2. \qquad (8.17)$$

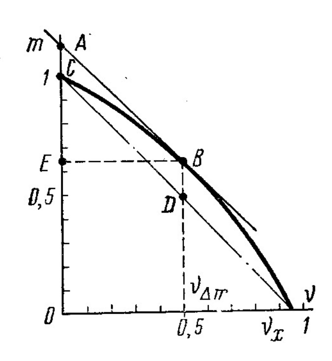


Рис. 8.9. Определение нелинейности механической характеристики

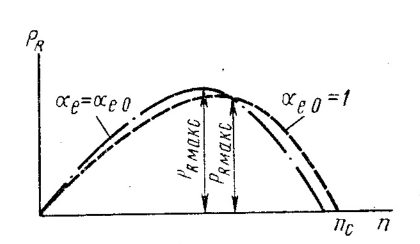


Рис. 8.10. Зависимость механической мощности от частоты вращения $P_R=f(n)$ при $\alpha_e=\text{const}$

Рекомендуется рассчитать кривую $m=f(\nu)$ по (8.17) и сравнить ее с опытной механической характеристикой.

Зависимость полезной мощности P_R от частоты вращения при постоянном коэффициенте сигнала для ИД с конденсатором ($\alpha=\alpha_0$) и сдвиге схемой ($\alpha_e=1$) показана на рис. 8.10. Из рисунка видно, что наибольшая механическая мощность имеет место при частоте вращения, близкой к $\nu=0,5$. Эту мощность принимают обычно за номинальную. У ИД с конденсатором полезная мощность несколько выше. При снижении коэффициента сигнала полезная мощность уменьшается, ее максимум смещается в сторону меньших скоростей.

На рис. 8.8 показано изменение мощности возбуждения и управления в зависимости от частоты вращения при постоянном коэффициенте сигнала для обеих схем включения двигателя.

При сдвиге схемой и $\alpha_e=1$ поле в машине круговое для любой частоты вращения; мощности возбуждения и управления равны $P_у=P_в$ и убывают с ростом частоты вращения. При сдвиге конденсатором (см. рис. 8.3, *а*) и $\alpha=\alpha_0$ мощности равны только в режиме пуска (поле круговое): $P_{у.к}=P_{в.к}$. Затем мощности перераспределяются между фазами: с увеличением частоты вращения n мощность управления резко падает, а мощность возбуждения растет,

так как из-за наличия конденсатора напряжение на обмотке возбуждения увеличивается. Такое перераспределение мощностей весьма благоприятно, так как всегда стремятся снизить мощность управления, которая обычно подается от усилителя.

При пуске ИД связь между обмотками возбуждения и управления отсутствует, так как оси обмоток расположены под углом 90°. В этом случае мощности возбуждения и управления зависят только от приложенного к фазе напряжения:

$$P_у \equiv U_у^2; \; P_в \equiv U_в^2.$$

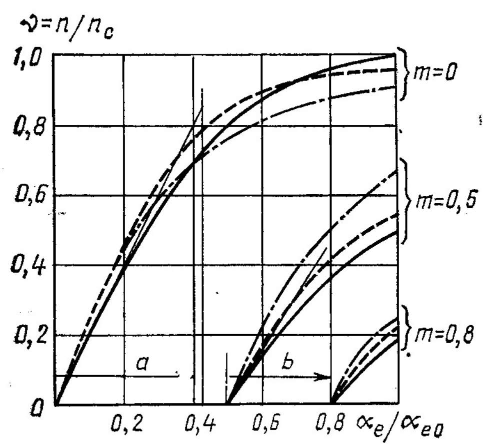


Рис. 8.11. Регулировочные характеристики $\nu=f\left(\frac{\alpha_e}{\alpha_{e0}}\right)$ при $m=\text{const}$:

———— идеальный двигатель;
— — — — ИД при сдвиге схемой;
—·—·— ИД при сдвиге конденсатором

Регулировочные характеристики двигателя $\nu=f(\alpha_e/\alpha_{e0})$ строятся по опытным данным для 2—3 постоянных значений моментов, например $m=0$ при холостом ходе, $m=0{,}8$ и $m=0{,}5$ при амплитудном управлении (сдвиг схемой) и амплитудно-фазовом управлении (сдвиг конденсатором), на одном графике (рис. 8.11) в относительных единицах. Для сравнения на этом же рисунке показаны регулировочные характеристики идеального двигателя, построенные по уравнению

$$\nu=2(\alpha_e-m)/(1+\alpha_e^2). \quad (8.18)$$

Регулировочные характеристики не прямолинейны, можно найти лишь зону пропорционального регулирования, т. е. диапазон изменения коэффициента сигнала, при котором скорость меняется пропорционально сигналу с определенной погрешностью. Обычно допускается погрешность $\Delta\nu=\pm5\%$. На рис. 8.11 зона пропорционального регулирования показана для идеального двигателя (зона *a* при $m=0$, зона *b* при $m=0{,}5$).

Зона пропорционального регулирования соответствует малым коэффициентам сигнала и относительно малым частотам вращения. Наибольшая крутизна соответствует начальной части характеристики $\nu=f(\alpha_e/\alpha_{e0})$. Благоприятное уменьшение относительных частот вращения $\nu=n/n_c$ достигается в первую очередь повышением частоты напряжения питания, так как с ростом f увеличивается и n_c.

При пуске в ход идеального двигателя ($\nu=0$) момент равен коэффициенту сигнала:

$$m_к=\alpha_e; \quad (8.19)$$

следовательно, напряжение трогания в относительных единицах равно моменту.

В реальном двигателе при всех схемах включения напряжение трогания пропорционально моменту сопротивления на валу.

Для оценки свойств асинхронного ИД при различных схемах включения на основании опытных данных следует рассчитать основные выходные показатели и свести их в таблицу, а затем провести сравнение и объяснить различие.

В качестве выходных показателей, характеризующих свойства ИД, обычно рассматриваются начальный пусковой момент $M_к$, номинальная полезная мощность на валу $P_{Rн}$, вращающий момент $M_н$ и частота вращения $n_н$, кратность пускового момента $k_п = M_к/M_н$, нелинейность механической характеристики Δm, соотношения мощности управления и возбуждения в номинальном режиме $P_{у.н}/P_{в.н}$ и при пуске $P_{у.к}/P_{в.к}$, электромеханическая постоянная времени $T_м$, относительное напряжение трогания $U_{у.трог}/U_{у.н}$, зона пропорционального регулирования $\Delta\alpha$ и КПД η. Электромеханическая постоянная времени, от значения которой зависит быстродействие ИД, рассчитывается по данным опытов (с):

$$T_м = J\pi\nu_x n_c/(30M_к), \tag{8.20}$$

где J — момент инерции, кг·м²; ν_x — относительная частота вращения холостого хода; $M_к$ — пусковой момент, Н·м.

При сравнении ИД следует также учитывать простоту схемы включения.

Вопросы для самопроверки

1. Чем отличается асинхронный ИД от силового двигателя? Сопоставить их конструкции и характеристики.

2. Укажите преимущества и недостатки ИД с полым немагнитным ротором по сравнению с ИД, имеющим обмотку на роторе типа «беличья клетка».

3. Перечислите основные требования, предъявляемые к ИД, и укажите, каким образом их удовлетворяют.

4. Какие имеются схемы включения и способы управления асинхронным ИД?

5. Что такое эффективный коэффициент сигнала и зачем он вводится?

6. При каких условиях получается круговое поле в асинхронных ИД и как опытным путем можно проверить его наличие?

7. Из каких соображений в ИД выполняют ротор с повышенным активным сопротивлением?

8. Что такое методический и технологический самоходы? Как их обнаружить?

9. Что такое напряжение трогания и как его можно определить? От чего зависит напряжение трогания?

10. Перечислите преимущества ИД при сдвиге конденсатором в обмотке возбуждения по сравнению с ИД при сдвиге схемой и амплитудном управлении.

11. Изменится ли напряжение на обмотке возбуждения двигателя с конденсатором при изменении нагрузки на валу?

12. Как определить значения эффективного коэффициента сигнала и емкости для ИД с конденсатором, при которых в двигателе получается круговое поле в режиме пуска? в номинальном режиме?

13. Сравните напряжения на обмотке возбуждения в ИД при сдвиге конденсатором и при сдвиге схемой (для $\alpha_e = 1$) при равенстве пусковых моментов (у одного и того же двигателя).

14. Почему ИД при снятии сигнала $U_у$ останавливается? В каком случае ИД остановится быстрее: при отключении обеих обмоток или только одной — и почему?

15. Как осуществить реверс ИД с конденсатором в обмотке возбуждения и ИД при сдвиге схемой?

§ 8.2. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Исполнительные двигатели постоянного тока широко распространены в системах автоматического управления и регулирования, в счетно-решающих устройствах.

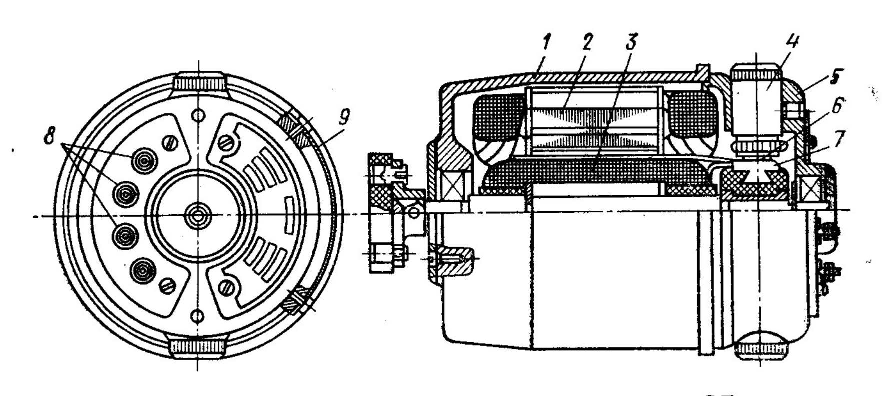


Рис. 8.12. Конструкция ИД постоянного тока типа СЛ:
1 — корпус; *2* — полюс; *3* — якорь; *4* — щеткодержатель; *5* — подшипниковый щит; *6* — щетки; *7* — коллектор; *8* — выводные концы; *9* — крышка смотрового люка

Главными достоинствами ИД являются:

1) линейность механических и регулировочных характеристик в широком диапазоне изменения напряжения управления при якорном управлении, а также линейность механических характеристик при полюсном управлении;

2) малые габариты и масса. Двигатель постоянного тока в 2—3 раза легче асинхронного ИД с полым ротором той же мощности;

3) высокий коэффициент полезного действия (40—70%) в номинальном режиме, в то время как у ИД переменного тока он меньше из-за наличия момента обратной последовательности и необходимости значительного увеличения сопротивления ротора для получения заданных свойств;

4) возможность якорного и полюсного управления.

К основным недостаткам ИД постоянного тока следует отнести наличие трущихся контактов (коллектора и щеток), обусловливающих нестабильную работу, снижающих надежность и усложняющих его эксплуатацию, и радиопомех, возникающих вследствие искрения на коллекторе, для подавления которых требуются дополнительные устройства (фильтры и др.). Необходимость более сложных усилителей постоянного тока для управления ИД постоянного тока сужает область его использования.

Исполнительный двигатель постоянного тока представляет собой управляемый микродвигатель с независимым возбуждением. Обычно конструкция его магнитной системы такая же, как и в машинах постоянного тока без добавочных полюсов (рис. 8.12). Наряду с ИД постоянного тока обычной конструкции применяются двигатели с полым немагнитным якорем, выполненные аналогично асинхронным ИД с полым ротором. Двигатель имеет две обмотки: обмотку возбуждения, расположенную на явновыраженных полюсах, и обмотку якоря. В двигателе отсутствуют дополнительные полюса, так как реакция якоря невелика и коммутация двигателей вполне удовлетворительна. Кроме того, в микромашинах практически нет места для установки дополнительных полюсов.

Если напряжение управления $U_у$ подается на обмотку якоря, а обмотка полюсов длительно находится под напряжением возбуждения $U_в$ (рис. 8.13, *а*), то такое управление называется *якорным*.

Если напряжение управления $U_у$ подается на обмотку полюсов, а обмотка якоря длительно включается на напряжение возбуждения $U_в$ (рис. 8.13, *б*), то управление называется *полюсным*.

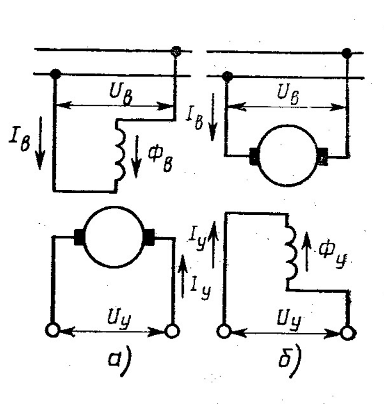


Рис. 8.13. Схема включения ИД постоянного тока

Важнейшими характеристиками ИД постоянного тока, так же как и ИД переменного тока (см. § 8.1), являются электромеханические характеристики, т. е. зависимость момента от частоты вращения $M=f(n)$ при постоянном напряжении управления $U_у$. При якорном и полюсном управлении соответственно

$$M=(c_M c_Ф \alpha U_в^2 - c_M c_Ф^2 C_E U_в^2 n)/r_я; \qquad (8.21)$$

$$M=(c_M c_Ф \alpha U_в^2 - c_M c_Ф^2 C_E \alpha^2 U_в^2 n)/r_я, \qquad (8.22)$$

где c_M, $c_Ф$, c_E — постоянные коэффициенты; α — коэффициент сигнала, равный отношению напряжения управления к напряжению возбуждения: $\alpha=U_у/U_в$; $r_я$ — сопротивление цепи якоря.

При неподвижном якоре ($n=0$) независимо от способа управления двигатель развивает начальный пусковой момент, пропорциональный квадрату напряжения возбуждения и коэффициенту сигнала:

$$M_к=c_M c_Ф \alpha U_в/r_я. \qquad (8.23)$$

Частота вращения «идеального» холостого хода исполнительного двигателя (при $M=0$) зависит от коэффициента сигнала. При якорном и полюсном управлении соответственно

$$n_{x\,i}=\alpha/(c_E c_Ф); \qquad (8.24)$$

$$n_{x\,i}=1/(c_E c_Ф \alpha). \qquad (8.25)$$

Как следует из (8.25), частота вращения якоря в режиме холостого хода ИД при полюсном управлении обратно пропорциональна коэффициенту сигнала, т. е. с уменьшением сигнала она увеличивается, в то время как при якорном управлении уменьшается.

Аналитическое выражение регулировочных характеристик $n=f(U_у)$ при различных способах управления находится из формул (8.21) и (8.22) при $M=\text{const}$ и $U_в=\text{const}$. Полезная мощность определяется исходя из формулы (8.11).

Сравнительная оценка свойств ИД постоянного и переменного тока проводится в относительных единицах. При этом за единицу частоты вращения у первого принимается частота «идеального» (теоретического) холостого хода n_{x0}. Под *идеальным холостым ходом* двигателя постоянного тока понимается такой режим, когда ЭДС якоря равна напряжению, ток в обмотке якоря и момент двигателя равны нулю, а коэффициент сигнала $\alpha=1$, т. е. $U_у=U_в$. Частота вращения холостого хода n_{x0} аналогична сихронной частоте вращения асинхронного двигателя и рассчитывается после снятия рабочих характеристик. Относительная частота вращения $\nu=n/n_{x0}$.

За единицу момента, как и для двигателя переменного тока, принимают момент $M_{к0}$ при неподвижном якоре ($n=0$) и напряжении управления, равном напряжению возбуждения ($\alpha=1$). Относительное значение момента $m=M/M_{к0}$. Значение $M_{к0}$ определяется из опыта.

За единицу мощности принимают мощность управления $P_{у.к0}$ в пусковом режиме ($n=0$) при коэффициенте сигнала $\alpha=1$; определяется она также из опыта. Относительная мощность $p_у=P_у/P_{у.к0}$.

Аналитические выражения основных характеристик ИД постоянного тока в относительных единицах приведены для различных способов управления в табл. 8.2.

Таблица 8.2

Характеристика	Аналитическое выражение при управлении		Графическое изображение при управлении	
	якорном	полюсном	якорном	полюсном
Механическая $m=f(\nu)$	$m=\alpha-\nu$	$m=\alpha-\alpha^2\nu$	Рис. 8.14, *а*	Рис. 8.14, *б*
Полезная мощность $p_R=f(\nu)$	$p_R=\nu\alpha-\nu^2$	$p_R=\nu\alpha-\nu^2\alpha^2$	Рис. 8.15, *а*	Рис. 8,15, *б*
Регулировочная $\nu=f(\alpha)$	$\nu=\alpha-m$	$\nu=(\alpha-m)/\alpha^2$	Рис. 8.16, *а*	Рис. 8.16, *б*
Мощность управления $p_у=f(\alpha)$	$p_у=\alpha^2-\alpha\nu$	$p_у=\alpha^2r_в/r_у$	Рис. 8.17 (сплошные линии)	Рис. 8.17 (штриховая линия)
Электромеханическая постоянная времени $T_м=f(\alpha)$	$T_м=Jn_{x0}\pi/(30M_{к0})$	$T_м=Jn_{x0}\pi/(30\times M_{к0}\alpha^2)$	—	—

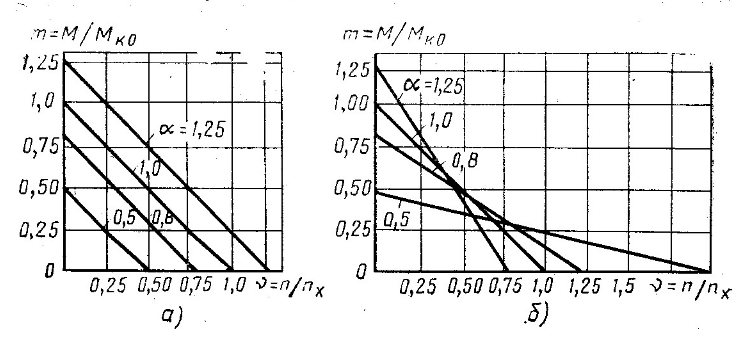


Рис. 8.14. Механические характеристики ИД постоянного тока $m=f(\nu)$ при $\alpha=\text{const}$

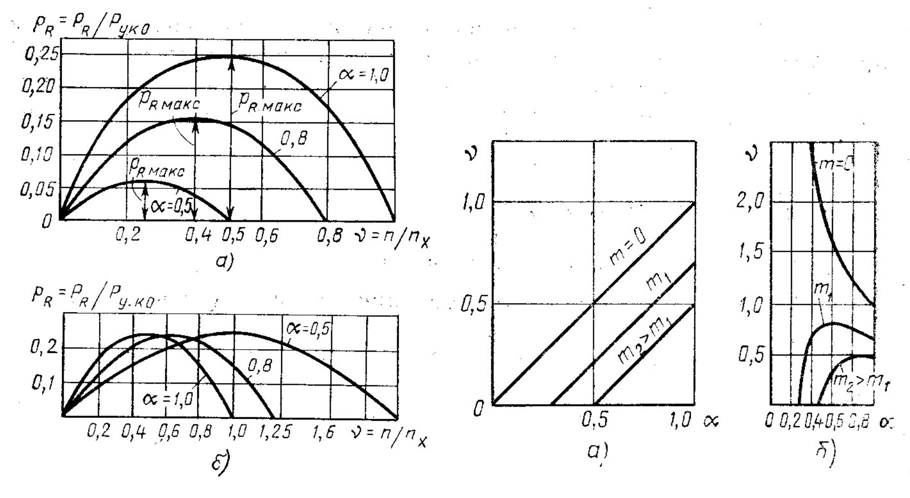


Рис. 8.15. Зависимости полезной мощности двигателя от частоты вращения $p_R=f(\nu)$ при $\alpha=\text{const}$

Рис. 8.16. Регулировочные характеристики $\nu=f(\alpha)$ при $m=\text{const}$

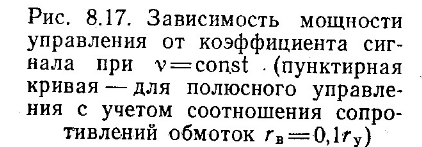
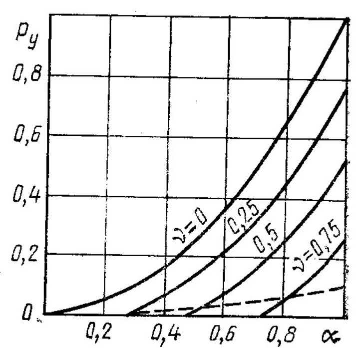


Рис. 8.17. Зависимость мощности управления от коэффициента сигнала при $\nu=\text{const}$ (пунктирная кривая — для полюсного управления с учетом соотношения сопротивлений обмоток $r_в=0{,}1r_у$)



Важнейшим свойством ИД постоянного тока, как и любого ИД, является быстродействие. Оценивается это свойство электромеханической постоянной времени $T_м$ — временем разгона двигателя от момента подачи номинального сигнала до установления частоты вращения, равной 0,633 от установившейся частоты вращения холостого хода.

Выражения для электромеханической постоянной времени $T_м$ при якорном и полюсном управлении также даны в табл. 8.2, из которой видно, что при якорном управлении $T_м$ не зависит от коэффициента сигнала, а при полюсном — зависит, что является большим недостатком последнего. При полюсном управлении и малых напряжениях управления время разгона якоря ИД значительно увеличивается. Это происходит вследствие уменьшения пускового момента и увеличения частоты вращения холостого хода при уменьшении $U_у$.

Цель работы — исследование рабочих, пусковых и регулировочных свойств ИД постоянного тока и сравнение их со свойствами ИД переменного тока (см. § 8.1). Объектом исследования является двигатель постоянного тока с независимым возбуждением.

ПРОГРАММА РАБОТЫ

А. Экспериментальные исследования

1. Ознакомиться с конструкцией двигателя и его паспортными данными.

2. Осуществить пуск двигателя в ход и изменение направления вращения.

3. Снять рабочие характеристики двигателя $I_в$, $I_у$, $P_в$, $P_у$, P_R, M, η в зависимости от n при $U_в=\text{const}$ и $U_у=\text{const}$: а) при якорном управлении для $\alpha=1$ и $\alpha=0{,}5$; б) при полюсном управлении для $\alpha=0{,}5$.

4. Снять регулировочные характеристики двигателя n, $I_у$, $I_в$, $P_у$, $P_в$, P_R в зависимости от $U_у$ при $M=\text{const}$: а) при якорном управлении для $M=0$ и $M=0{,}5M_{к0}$; б) при полюсном управлении для $M=0$; $M=0{,}2M_{к0}$ и $M=0{,}5M_{к0}$.

5. Найти зависимость мощности управления от напряжения управления $P_у=f(U_у)$ при $n=0$ и $n=n_н$: а) при якорном управлении; б) при полюсном управлении.

Б. Расчеты и построения

1. Вычертить эскиз ИД постоянного тока.

2. Построить механические характеристики двигателя в относительных единицах $m=f(\nu)$: а) при якорном управлении для $\alpha=1$ и $\alpha=0{,}5$; б) при полюсном управлении для $\alpha=0{,}5$.

3. Построить зависимости $P_R=f(n)$ в размерных единицах: а) при якорном управлении для $\alpha=1$ и $\alpha=0{,}5$; б) при полюсном управлении для $\alpha=0{,}5$.

4. Построить зависимости $P_в = f(n)$ и $P_у = f(n)$ в размерных единицах для $\alpha = 0{,}5$: а) при якорном управлении; б) при полюсном управлении.

5. Построить регулировочные характеристики в относительных единицах: а) при якорном управлении для $m = 0$ и $m = 0{,}5$; б) при полюсном управлении для $m = 0$; $m = 0{,}2$ и $m = 0{,}5$.

6. Построить зависимость $P_у = f(U_у)$ в размерных единицах для $n = 0$ и $n_н$: а) при якорном управлении; б) при полюсном управлении.

7. Сравнить свойства ИД при якорном и полюсном управлении.

ПОЯСНЕНИЯ И УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

Одна из возможных схем для испытания двигателя представлена на рис. 8.18.

Для измерения вращающего момента двигателя можно применить электромагнитный тормоз. Может быть использовано также любое другое тормозное устройство (см. § 2.2). Частота вращения измеряется строботахометром, часовым или обычным тахометром в зависимости от мощности испытуемого двигателя. При измерении частоты вращения строботахометром необходимо тщательно следить за правильностью отсчета, не допуская ошибок в выборе коэффициента кратности (см. § 2.3).

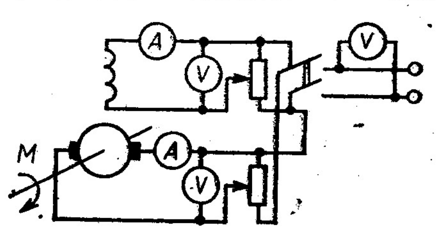


Рис. 8.18. Схема для испытания ИД постоянного тока

Пределы измеряемых частот вращения должны быть установлены в соответствии с паспортными данными двигателя и ожидаемыми при снятии характеристик значениями. Следует обратить внимание на ожидаемые пределы измерения частот вращения в характеристиках двигателя при полюсном управлении.

Перед началом испытания необходимо ознакомиться с конструкцией двигателя и его паспортными данными, рассчитать на основе паспортных данных номинальный вращающий момент двигателя (Н·м):

$$M_н = 9{,}55 P_{Rн} / n_н, \qquad (8.26)$$

где $P_{Rн}$ — номинальная полезная мощность, Вт; $n_н$ — номинальная частота вращения, об/мин.

Далее следует осуществить пуск в ход двигателя и изменение направления вращения. При обоих направлениях вращения проверяется частота вращения при номинальной нагрузке ($M = M_н$) и коэффициенте сигнала $\alpha = 1$ ($U_у = U_в = U_н$).

Для получения стабильных характеристик испытуемого двигателя целесообразно предварительно нагрузить его номинальным моментом и дать поработать при постоянной нагрузке 15—20 мин. За это время температура обмоток практически установится.

Основными характеристиками ИД являются рабочие, регулировочные и зависимость мощности управления от коэффициента сигнала.

Рабочие характеристики. Они представляют собой зависимости $I_в$, $I_у$, $P_в$, $P_у$, M, η от n при $U_в=\text{const}$ и $U_у=\text{const}$. Рабочие характеристики получаются изменением механической нагрузки на валу двигателя в диапазоне изменения частот вращения от холостого хода ($n=n_{x0i}$ при $M\approx 0$) до остановки ($n=0$).

Рабочие характеристики снимаются при двух способах управления: 1) якорном; 2) полюсном.

Напряжение возбуждения на обмотках полюсов или якоря поддерживается постоянным и равным номинальному значению. Напряжение управления (соответственно на обмотке якоря или полюсов) устанавливается потенциометром.

Рабочие характеристики снимаются для коэффициентов сигнала $\alpha=1(U_у=U_в=U_н)$ и $\alpha=0{,}5(U_у=0{,}5U_н)$. В том случае, когда $\alpha=1$, рабочие характеристики при якорном и полюсном управлении совпадают, так как напряжения на обеих обмотках при этих способах управления одинаковы.

Для получения рабочих характеристик необходимо выделить три основных режима работы двигателя и определить для них моменты, мощности, токи, частоты вращения: при холостом ходе, номинальной нагрузке или близкой к ней, коротком замыкании.

Начальный пусковой момент $M_к$ при $n=0$ определяется с помощью тормозного устройства при включении обмоток заторможенного двигателя на напряжения $U_в$ и $U_у$, соответствующие заданным сигналам $\alpha=1$ и $\alpha=0{,}5$.

После снятия рабочих характеристик рекомендуется для контроля правильности измерений построить механические характеристики в размерных единицах, а также зависимости полезной мощности от частоты вращения. Для построения механических характеристик в относительных единицах необходимо рассчитать базовые величины. Последние определяются в процессе снятия рабочих характеристик следующим образом.

Частота вращения при «идеальном» холостом ходе (об/мин)

$$n_{x0}=U_н n_i/E_i, \tag{8.27}$$

где $U_н$ — номинальное напряжение двигателя, В; n_i — частота вращения, об/мин, при произвольной нагрузке и $\alpha=1$; $E_i=U_н-I_я r_я$ — ЭДС, соответствующая этой нагрузке, В; $I_я$ — ток в якоре, соответствующий той же нагрузке, А; $r_я$ — сопротивление обмотки якоря, Ом.

Базовые момент $M_{к0}$ и мощность $P_{у.к0}$ определяются из опыта в пусковом режиме ($n=0$) при $\alpha=1$.

Регулировочные характеристики. Они снимаются по той же схеме (рис. 8.18) для постоянного момента на валу двигателя: а) при якорном управлении для $M=0$ и $M=0{,}5M_{к0}$; б) при полюсном управлении для $M=0$; $M=0{,}2M_{к0}$ и $M=0{,}5M_{к0}$.

При снятии регулировочных характеристик необходимо точно фиксировать напряжение трогания $U_{\text{у.трог}}$, соответствующее частоте вращения $n=0$. Напряжение управления в процессе опыта изменяется от 0 до $1{,}25U_{\text{н}}$.

При якорном управлении для построения характеристик снимаются значения в 3—4 точках, так как регулировочные характеристики линейны. При полюсном управлении число точек должно быть бо́льшим.

Зависимость мощности управления от коэффициента сигнала. При постоянной частоте вращения она снимается также по схеме, приведенной на рис. 8.18, для двух случаев: при неподвижном роторе ($n=0$), при частоте вращения $n=n_{\text{н}}$. В процессе снятия зависимости $P_{\text{у}}=f(U_{\text{у}})$ при $n=n_{\text{н}}$ для поддержания постоянной частоты вращения, изменяющейся при изменении сигнала, следует менять соответствующим образом тормозящий момент.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Механические характеристики при различных коэффициентах сигнала α для якорного и полюсного способов управления представлены на рис. 8.14, *а, б* соответственно. Это семейства прямых, каждая из которых отсекает на оси ординат (при $n=0$) отрезки, соответствующие пусковым моментам двигателя, а на оси абсцисс — отрезки, соответствующие частоте вращения при холостом ходе (при $m=0$):

при якорном управлении

$$m_{\text{к}}=\alpha;\ \nu_{\text{х}}=\alpha; \tag{8.28}$$

при полюсном управлении

$$m_{\text{к}}=\alpha;\ \nu_{\text{х}}=1/\alpha. \tag{8.29}$$

При коэффициенте сигнала $\alpha=1$ пусковой момент $m_{\text{к0}}=1$ и частота вращения холостого хода $\nu_{\text{х0}}=1$.

Из сравнения механических характеристик при двух способах управления видно, что при $\alpha=1$ они совпадают, а при других значениях α характеристики для полюсного управления проходят более полого, т. е. относительно малым изменениям вращающего момента соответствуют относительно большие изменения частоты вращения. Это объясняется уменьшением потока возбуждения при снижении напряжения управления.

При якорном управлении механические характеристики линейны и не изменяют наклона с изменением сигнала. Это обстоятельство подтверждает независимость быстродействия при этом способе управления от значения сигнала.

Кривые $p_R=f(\nu)$ для разных α приведены на рис. 8.15. Максимальная мощность при якорном управлении (см. рис. 8.15, *а*) зависит от α:

$$p_{R\,\text{макс}}=\alpha^2/4, \tag{8.30}$$

а при полюсном управлении (см. рис. 8.15, *б*) она постоянна:

$$p_{R\,\text{макс}} = 1/4. \qquad (8.31)$$

Из кривых, представленных на рис. 8.15, видно, что зависимость $p_R = f(\nu)$ для двигателя постоянного тока проходит через нуль в двух точках оси абсцисс (при пуске, когда $\nu = 0$, и при холостом ходе, когда $m = 0$) и имеет максимум при оптимальной частоте вращения:

при якорном управлении

$$\nu_{\text{опт}} = \nu_x/2 = \alpha/2; \qquad (8.32)$$

при полюсном управлении

$$\nu_{\text{опт}} = 1/(2\alpha). \qquad (8.33)$$

Частота вращения $\nu_{\text{опт}}$ при $\alpha = 1$ и мощность $p_{R\text{макс}}$, соответствующая ей, принимаются у ИД за номинальные значения.

В отличие от машин средней и большой мощности ИД проектируются без запаса мощности; перегрузочная способность их равна единице.

Независимость максимума механической мощности от напряжения управления (коэффициента сигнала α) — ценное свойство полюсного управления, позволяющее незначительными по мощности сигналами управлять значительными мощностями на валу двигателя.

Регулировочные характеристики, соответствующие двум схемам управления, представлены на рис. 8.16, *а, б*. При якорном управлении регулировочные характеристики изменяются по линейному закону во всем диапазоне изменения напряжения управления, при полюсном управлении регулировочные характеристики имеют криволинейный характер.

Линейность регулировочной характеристики ИД постоянного тока с якорным управлением во всем диапазоне регулирования — преимущество перед ИД переменного тока при использовании его в схемах автоматики и счетно-решающих устройств. Нелинейность регулировочных характеристик — большой недостаток двигателя с полюсным управлением. Но еще большим недостатком при этом является неоднозначность регулирования, т. е. одна и та же частота вращения может быть достигнута двигателем при двух значениях напряжения управления (коэффициента сигнала α).

Неустойчивость регулирования частоты вращения ИД при полюсном управлении проявляется в том случае, когда момент на валу равен нулю. При малом сигнале управления частота вращения в режиме холостого хода может превысить номинальную в несколько раз. Это весьма опасно, так как может привести к механическим повреждениям узлов двигателя. Для предотвращения этого при пониженном $U_у$ обеспечивают работу ИД с постоянным моментом на валу не ниже $0{,}5M_{к0}$.

Анализ зависимостей мощности управления от коэффициента сигнала для двух способов управления показывает, что при якор-

ном управлении (см. рис. 8.17) мощность управления, равная практически всей потребляемой двигателем мощности за вычетом потерь на возбуждение, резко возрастает с увеличением коэффициента сигнала. Это обстоятельство часто заставляет снижать напряжение управления, что, однако, приводит к уменьшению максимальной полезной механической мощности. Максимальная мощность управления при якорном управлении соответствует режиму короткого замыкания (т. е. неподвижному ротору: $n=0$). Достаточно большая мощность управления приводит к необходимости увеличивать мощность и габариты усилителя, питающего обмотку якоря.

При полюсном управлении мощность управления незначительна по сравнению с мощностью при якорном управлении (5—30% от потребляемой мощности). Она лишь покрывает электрические потери в обмотках полюсов, не зависит от частоты вращения и нагрузки, менее резко возрастает при увеличении коэффициента сигнала (см. рис. 8.17).

Однако вследствие линейности механических и регулировочных характеристик наибольшее распространение в устройствах автоматики получило якорное управление. Этот способ управления широко используется в двигателях с постоянными магнитами.

По результатам проведенных опытов необходимо сравнить свойства ИД при якорном и полюсном управлении. Опытные и расчетные данные для сравнения рекомендуется выписать в таблицу. Следует также сравнить свойства ИД постоянного и переменного тока (см. § 8.1).

Вопросы для самопроверки

1. Назовите способы управления ИД постоянного тока.
2. Перечислите достоинства и недостатки используемых в ИД постоянного тока способов управления.
3. Какой вид имеют механические характеристики ИД при якорном и полюсном управлении?
4. Назовите главное достоинство регулировочных характеристик ИД при якорном управлении.
5. При каких моментах на валу регулировочные характеристики двигателя при полюсном управлении пригодны для работы в автоматических устройствах?
6. При каких условиях определяют базовые моменты и мощности у ИД постоянного тока?
7. Как измерить начальный пусковой момент ИД постоянного тока?
8. При каких условиях холостой ход ИД называют «идеальным»?
9. При каком способе управления и при каких значениях момента регулировочные характеристики ИД двузначны, неустойчивы?
10. Как влияет на быстродействие ИД коэффициент сигнала α: а) при якорном управлении; б) при полюсном управлении?
11. Как влияет на быстродействие ИД момент инерции ротора?

Глава 9

ИСПЫТАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МИКРОМАШИН

§ 9.1. АСИНХРОННЫЙ ТАХОГЕНЕРАТОР (ТГ)

Тахогенератором называется электрическая машина, предназначенная для преобразования механической величины — частоты вращения — в пропорциональный ей электрический сигнал. Асинхронный ТГ представляет собой индукционную двухфазную машину с полым немагнитным ротором. Конструкция его принципиально мало отличается от асинхронных ИД с полым ротором (см. § 8.1). Оси обмоток статора тахогенератора сдвинуты в пространстве на электрический угол 90°. Обмотка возбуждения *ОВ* включается в сеть (рис. 9.1); с выходной (или генераторной) обмотки *ОГ* снимается выходное напряжение тахогенератора.

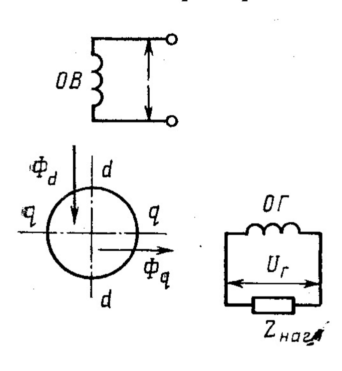


Рис. 9.1. Схема включения асинхронного ТГ

Асинхронные ТГ выполняются в трех конструктивных формах: с обмотками на внешнем статоре, с обмотками на внутреннем статоре, с одной обмоткой на внешнем и другой (обычно обмоткой возбуждения) на внутреннем статоре (при этом предусматривается возможность поворота внутреннего статора относительно наружного). Конструкция такого ТГ приведена на рис. 9.2.

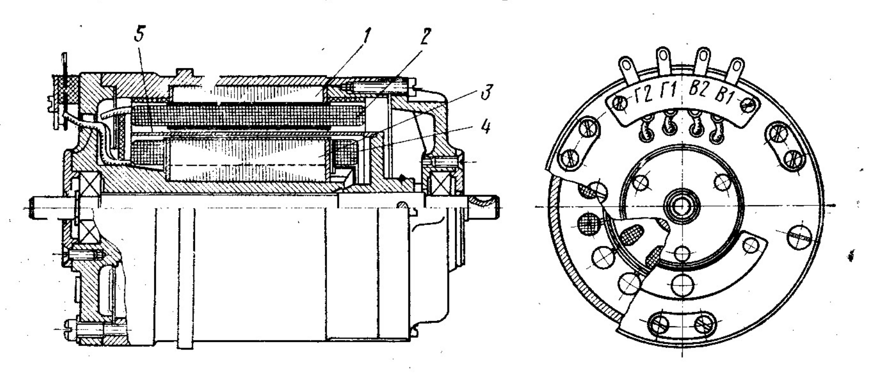


Рис. 9.2. Конструкция асинхронного ТГ:

1 — внешний статор; *2* — обмотка возбуждения; *3* — внутренний статор; *4* — генераторная обмотка; *5* — полый ротор

Иногда асинхронные ТГ выполняются в одном корпусе с ИД.

Ротор ТГ имеет большее активное сопротивление, чем ИД. Он выполняется из константана, специального манганина, фосфори-

стой, марганцовистой бронзы или других сплавов с высоким активным сопротивлением, мало меняющимся при изменении температуры. Реже используются алюминиевые сплавы. При изготовлении полого ротора стремятся повысить однородность структуры материала и возможно точнее выдержать размеры.

Основные требования, предъявляемые к асинхронным ТГ:

1) большая крутизна выходной характеристики $k_U = U_г/n$;

2) минимальная нелинейность выходной характеристики;

3) минимальное значение остаточной ЭДС;

4) минимальное изменение фазы выходного напряжения;

5) стабильность выходной характеристики;

6) максимальная выходная мощность при минимальной мощности возбуждения;

7) малые момент инерции ротора и момент сопротивления;

8) минимальные габариты и масса.

По назначению асинхронные ТГ можно разделить на три группы:

1) выполняющие функции демпфирования в следящих системах. Требования по точности к ним весьма невелики;

2) указатели скорости, применяемые в устройствах стабилизации частоты вращения. Нелинейность выходной характеристики у них не превышает 0,5—1,0%;

3) элементы счетно-решающих устройств. К ним предъявляются высокие требования линейности характеристик, стабильности и надежности в работе.

Рассмотрим принцип действия асинхронного ТГ. Магнитодвижущая сила обмотки возбуждения создает магнитный поток, пульсирующий по продольной оси d (рис. 9.1). Если ротор неподвижен, то в нем наводится только ЭДС трансформации. Возникающие в роторе вихревые токи создают поток, согласно закону Ленца направленный встречно потоку обмотки возбуждения. Результирующий магнитный поток Φ_d машины направлен только по оси d и в идеальном случае не наводит ЭДС в генераторной обмотке, ось которой совпадает с осью q.

При вращении ротора кроме ЭДС трансформации наводится ЭДС вращения, пропорциональная частоте вращения. Под действием ЭДС вращения в роторе возникают токи, которые создают магнитный поток Φ_q по поперечной оси. Поток Φ_q индуцирует в генераторной обмотке ЭДС, пропорциональную частоте вращения. Частоты ЭДС генераторной обмотки, потока Φ_q и ЭДС вращения ротора равны частоте сети.

Уравнение выходной характеристики асинхронного тахогенератора имеет вид [2, 10]

$$\dot{U}_г = -jk\dot{U}_в \nu/(\dot{A} - \dot{B}\nu^2), \tag{9.1}$$

где $k = w_г k_{ог}/(w_в k_{ов})$ — коэффициент трансформации; $\nu = n/n_c$ — относительная частота вращения ротора; $\dot{A}$ и $\dot{B}$ — комплексные коэффициенты, зависящие от параметров схемы замещения и сопротивления нагрузки.

Крутизна выходной характеристики характеризует чувствительность ТГ

$$k_U = U_г/n = U_г/(\nu n_с) = kU_в/(n_с\,|\,\dot{A} - \dot{B}\nu^2\,|\,) \approx kU_в/(n_с\,|\,\dot{A}\,|\,). \quad (9.2)$$

Крутизна k_U зависит от коэффициента трансформации k, напряжения возбуждения $U_в$ и модуля комплексного коэффициента $\dot{A}$. Колебания этих величин (кроме k), связанные с условиями эксплуатации (изменением температуры, нестабильностью напряжения и частоты сети), приводят к изменению выходной характеристики тахогенератора и появлению погрешностей. Однако даже при идеальных условиях работы (неизменных температуре, напряжении сети и частоте) ТГ имеет погрешности, обусловленные нелинейностью уравнения выходной характеристики. Их значение зависит от соотношения $\nu^2\dot{B}/\dot{A}$.

Наличие погрешностей связано с изменением напряжения ТГ по амплитуде и фазе в зависимости от частоты вращения.

Амплитудной погрешностью ΔU называют отклонение реальной характеристики $U_г = f(n)$ при данной частоте вращения n от идеальной, выраженное в процентах от номинального значения выходного напряжения $U_{г.н}$ (при $n = n_н$):

$$\Delta U = (U_г - U_i)\,100/U_{г.н}. \quad (9.3)$$

Фазовой погрешностью $\Delta\varphi$ называется отклонение фазы выходного напряжения $U_г$ от фазы напряжения, принятого за базовое.

В зависимости от причин, обусловливающих погрешности, их подразделяют на скоростные, температурные, частотные и др.

Скоростные погрешности вызываются нелинейностью уравнения выходной характеристики ТГ. Для их снижения стараются уменьшить при проектировании ТГ величину $\nu^2 B/A$ за счет уменьшения как относительной скорости ν, так и величины $\dot{B}/\dot{A}$.

Чтобы получить минимальные скоростные погрешности, ТГ, особенно точные, рассчитывают на работу от сети повышенной частоты (400, 500, 1000 Гц) и выполняют с малым числом пар полюсов p. При этом снижается номинальная относительная скорость:

$$\nu_н = n_н/n_с = n_н p/(60 f).$$

Для уменьшения магнитной и электрической несимметрии число пар полюсов выбирают не меньше двух.

Комплексную величину B/A можно снизить либо за счет уменьшения коэффициента трансформации k и сопротивления обмотки возбуждения Z_{SB}, либо за счет увеличения сопротивления нагрузки $Z_{нагр}$ и активного сопротивления полого ротора r_{RB}. Для повышения r_{RB} при изготовлении ротора применяют материалы с высоким удельным сопротивлением (манганин, константан и др.), для понижения Z_{SB}, в первую очередь r_{SB}, увеличивают площадь пазов статора.

Снижение скоростных погрешностей почти всегда вызывает уменьшение крутизны выходной характеристики тахогенератора.

Поэтому при проектировании исходят из назначения ТГ и в зависимости от этого добиваются или минимальной скоростной погрешности, или максимальной крутизны. У точных ТГ, предназначенных для счетно-решающих устройств, амплитудная погрешность $\Delta U = 0{,}05 \div 0{,}2\%$, фазовая погрешность $\Delta\varphi$ составляет несколько минут, крутизна $k_U = 1 \div 3$ мВ/(об/мин); у ТГ следящих систем $\Delta U = 1 \div 2{,}5\%$, $k_U = 6 \div 10$ мВ/(об/мин); фазовая погрешность $\Delta\varphi$ достигает нескольких градусов.

Скоростные погрешности могут быть уменьшены и за счет правильного выбора (где это возможно) характера нагрузки $Z_{нагр}$: активного, индуктивного, емкостного [10]. Однако можно уменьшить либо амплитудную, либо фазовую погрешность, поэтому в каждом конкретном случае сначала необходимо оценить, снижение какой из погрешностей наиболее важно.

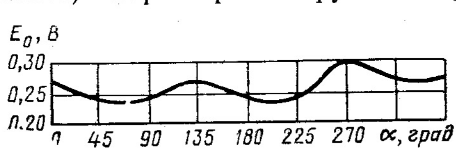


Рис. 9.3. Зависимость остаточной ЭДС от угла поворота ротора

Физическая природа скоростных погрешностей связана с рядом факторов: падением напряжения в генераторной обмотке; уменьшением поперечного потока за счет реакции генераторной обмотки; падением напряжения в обмотке возбуждения в зависимости от тока возбуждения, что ведет к изменению потока возбуждения; влиянием ЭДС ротора, наводимой поперечным полем; изменением параметров ротора r_{RB} и x_{RB} в зависимости от частоты вращения.

Температурные погрешности ТГ обусловлены изменением активных сопротивлений ротора и обмотки статора в зависимости от температуры. Для снижения их до минимума роторы выполняются из материалов, сопротивление которых мало зависит от температуры. Кроме того, применяют термосопротивления, стабилизирующие активное сопротивление цепи возбуждения, или автоматически поддерживают температуру обмоток постоянной с помощью регулируемых нагревательных элементов.

Частотные погрешности обусловлены изменением индуктивных сопротивлений обмоток и магнитных потоков тахогенератора при колебаниях частоты питающего напряжения. Единственный способ их устранения — стабилизация частоты.

Точность асинхронных тахогенераторов зависит также от остаточной ЭДС E_0, наводимой в генераторной обмотке при неподвижном роторе. Значение остаточной ЭДС зависит от углового положения ротора (рис. 9.3).

Различают постоянную и переменную составляющие ЭДС E_0:

$$E_{0\,ср} = (E_{0\,макс} + E_{0\,мин})/2;$$

$$\Delta E_0 = (E_{0\,макс} - E_{0\,мин})\,/\,2.$$

Причины ее возникновения: неточный сдвиг обмоток на угол 90°; несимметрия магнитной цепи из-за неравномерности воздуш-

ного зазора, анизотропии характеристик электротехнической стали; наличие потоков рассеяния; несимметрия полого ротора и др.

Последняя причина обусловливает появление переменной составляющей остаточной ЭДС, остальные — постоянной. У современных тахогенераторов постоянная составляющая $E_{0ср}=25 \div 100$ мВ, переменная $\Delta E_0 = 3 \div 7$ мВ.

Наличие остаточной ЭДС — основная причина несимметрии выходной характеристики тахогенератора в зависимости от направления вращения ротора, особенно при малых частотах вращения.

В зависимости от значения погрешностей асинхронные тахогенераторы разделяются по классам точности, которые устанавливаются по наихудшему параметру в соответствии с табл. 9.1.

Таблица 9.1

Параметры точности	Класс точности						
	0,02	0,03	0,05	0,1	0,2	0,5	1
Нелинейность выходного напряжения, %, не более	±0,02	±0,03	±0,05	±0,10	±0,20	±0,50	±1,0
Отношение остаточной ЭДС к крутизне выходного напряжения, об/мин, не более	10	10	20	20	20	25	100
Фазовая погрешность, мин, не более	±15	±20	±20	±25	—	—	—

Таблица 9.2

Тип тахогенератора	Частота f, Гц	Напряжение возбуждения $U_в$, В	Синхронная частота вращения n_c, об/мин	Максимальная рабочая частота вращения $n_н$, об/мин	Крутизна k_U, мВ/(об/мин)	Амплитудная погрешность ΔU, %	Остаточная ЭДС E_0, мВ	Масса, кг
АТ-231	500	110	15 000	4000	5,5±0,5	0,10	I кл.—25 I кл.—75	2,10
АТ-261	400	110	12 000	4000	5,3±0,5	0,15	100	1,85
АТ-161	400	110	12 000	4000	4,0	0,15	80	0,90
ТГ-5А	400	115	12 000	9000	1,2	2,50	50	0,30
АТ-2	400	115	12 000	5000	1,0	0,30	25	0,27

Асинхронные ТГ применяются в системах автоматики благодаря ряду преимуществ: независимости частоты выходного напряжения от частоты вращения; отсутствию скользящих контактов; малому моменту сопротивления из-за отсутствия радиальных и аксиальных сил, действующих на ротор; высокой надежности; достаточной стабильности характеристик.

Недостатки асинхронных тахогенераторов: нелинейность выходной характеристики; наличие фазовой погрешности; малая выходная мощность; низкий коэффициент мощности обмотки возбуждения из-за большого немагнитного зазора; большие габариты и масса.

Исследуется асинхронный тахогенератор с полым ротором, выполненным из материала с большим удельным сопротивлением и малым температурным коэффициентом сопротивления.

Объектом исследования могут служить тахогенераторы типа АТ, ТГ повышенной частоты (400 или 500 Гц). Основные технические данные некоторых тахогенераторов приведены в табл. 9.2.

Цель исследования — изучение свойств тахогенератора, определение основных характеристик и выходных показателей.

ПРОГРАММА ИССЛЕДОВАНИЙ

А. Экспериментальные исследования

1. Ознакомиться с конструкцией ТГ и основными техническими данными.
2. Снять выходную характеристику ТГ $U_г=f(n)$ при $U_в=U_{в.н}$: а) для холостого хода $Z_{нагр}=\infty$; б) для активной нагрузки $R_{нагр}=500$ Ом.
3. Снять внешнюю характеристику ТГ $U_г=f(Z_{нагр})$ при $U_в=U_{в.н}$, $n=n_н$ и нагрузке: а) активной; б) емкостной; в) индуктивной.
4. Определить остаточную ЭДС в зависимости от угла поворота ротора $E_0=f(\theta)$.
5. Определить амплитудную и фазовую погрешности ТГ.

Б. Расчеты и построения

1. Начертить эскиз ТГ.
2. Построить на одном графике выходные характеристики $U_г=f(n)$ тахогенератора для холостого хода и активной нагрузки.
3. Определить крутизну выходных характеристик тахогенератора.
4. Построить на одном графике внешние характеристики тахогенератора $U_г=f(Z_н)$ при различных характерах нагрузки.
5. Построить зависимость остаточной ЭДС от угла поворота ротора $E_0=f(\theta)$. Определить переменную составляющую ЭДС ΔE_0.

ПОЯСНЕНИЯ И УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

Испытания ТГ проводятся по схеме, приведенной на рис. 9.4. Тахогенератор приводится во вращение двигателем постоянного тока. Частота вращения измеряется стробоскопическим тахометром; выходное напряжение $U_г$ — прибором с большим входным сопротивлением. В качестве нагрузок используются магазины сопротивлений, емкостей и индуктивностей.

Выходная характеристика (рис. 9.5) ТГ снимается в диапазоне частот вращения от 0 до $1{,}5n_н$ при $Z_{нагр}=\infty$ (кривая *1*) и $Z_{нагр}=R$

(кривая *2*). При снятии выходной характеристики необходимо проверить номинальное выходное напряжение $U_{г.н}$ при номинальной частоте вращения $n_н$.

Крутизна выходной характеристики определяется при номинальной частоте вращения по формуле

$$k_U = U_{г.н}/n_н.$$

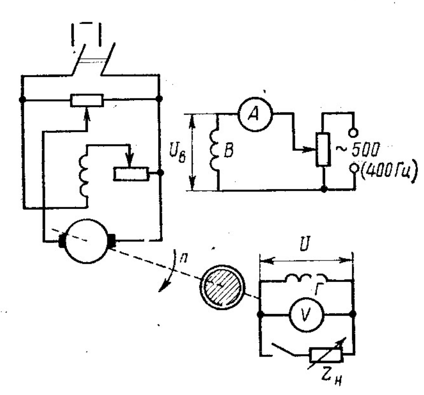


Рис. 9.4. Схема испытания асинхронного ТГ

u = Uг/Uг.н
1,0
0,5
1
2
E0
0
0,1
0,2 ν = n/nс

Рис. 9.5. Выходная характеристика ТГ

Внешние характеристики ТГ снимаются при сопротивлениях нагрузки, равных 500, 2000, 4000 и 10 000 Ом. При емкостном или индуктивном характере нагрузки емкости или индуктивности должны обеспечивать указанные сопротивления.

Остаточная ЭДС определяется при медленном повороте ротора в пределах одного оборота. Фиксируются максимальное и минимальное значения ЭДС. Наибольшее значение принимается за остаточную ЭДС ТГ. Переменная составляющая находится как разность наибольшего и наименьшего значений:

$$\Delta E_0 = (E_{0\,макс} - E_{0\,мин})/2.$$

Опытное определение амплитудной и фазовой погрешностей асинхронного ТГ — весьма сложная задача. Оно требует, во-первых, высокой точности измерения выходного напряжения, которую могут обеспечить только компенсационные методы измерения, и, во-вторых, поддержания точных значений стабилизированных частот вращения в рабочем диапазоне тахогенератора. На рис. 9.6 приведена схема для определения погрешностей асинхронного тахогенератора. Она состоит из следующих основных блоков: блока привода стабилизированной частоты вращения *БПС*; блока измерительно-компенсационного *БИК*, предназначенного для компенсации ЭДС вращения тахогенератора; блока компенсации остаточной ЭДС *БКО*.

Привод стабилизированной частоты вращения обеспечивает плавное ее изменение и поддержание с точностью до 1 об/мин.

Частота вращения измеряется стробоскопическим методом при стабильности частоты источника синхронизации не менее 0,01 %.

Блок измерительно-компенсационный с помощью индукционного фазовращателя $ИФ_1$, вращающегося трансформатора *СКВТ* и делителя напряжения *ДН* компенсирует выходную ЭДС тахогенератора. Контроль компенсации осуществляется ламповым вольтмет-

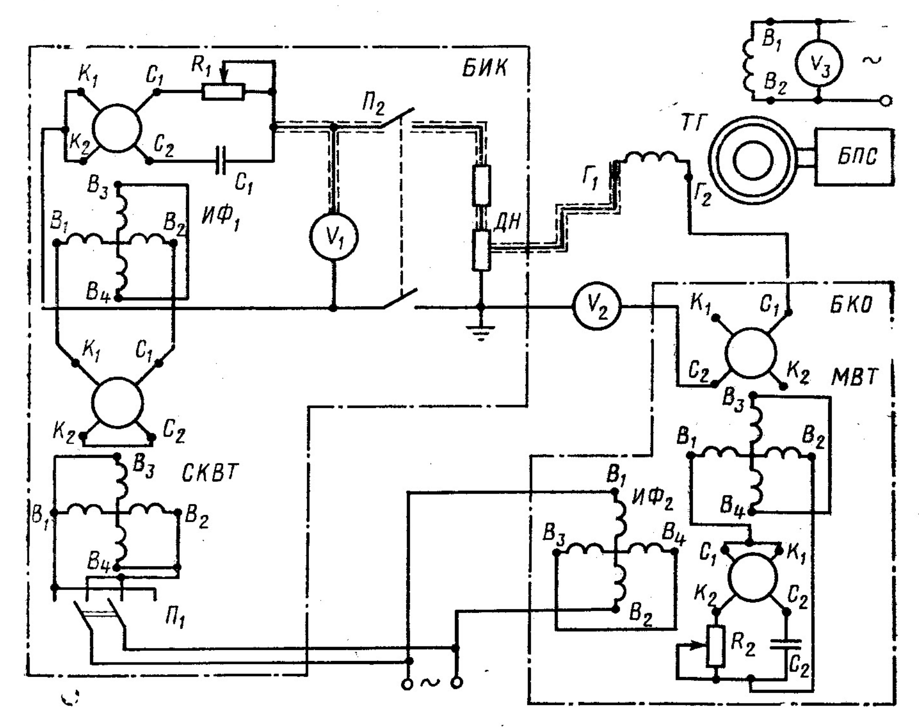


Рис. 9.6. Схема стенда для определения амплитудной и фазовой погрешностей асинхронного ТГ

ром V_2. Редуктор для вращения фазовращателя $ИФ_1$ должен быть снабжен шкалой, позволяющей отсчитывать угол поворота ротора с точностью не менее 5 угл. мин.

Предварительно производится компенсация остаточной ЭДС индукционным фазовращателем $ИФ_2$ и поворотным (вращающимся) трансформатором *МВТ*.

По полученным значениям амплитудной и фазовой погрешностей и остаточной ЭДС оценивается исходя из данных табл. 9.1 класс точности исследуемого тахогенератора.

Вопросы для самопроверки

1. Где у асинхронного тахогенератора располагаются обмотки возбуждения и генераторная?
2. Из каких материалов выполняется полый ротор тахогенератора? Почему?

3. Напишите и объясните уравнение выходной характеристики тахогенератора в общем виде.

4. Что такое амплитудная и фазовая погрешности?

5. Какими средствами можно уменьшить погрешности тахогенератора?

6. Какую частоту имеет выходное напряжение тахогенератора?

7. Что такое остаточная ЭДС и какими причинами она вызывается?

8. Какие меры применяются для уменьшения остаточной ЭДС?

9. Как меняется крутизна выходной характеристики в зависимости от характера нагрузки?

10. Как влияет на остаточную ЭДС поворот ротора относительно статора? Объясните физику явления.

11. Как меняется фаза выходного напряжения в зависимости от характера нагрузки?

12. В каких устройствах используется тахогенератор, каковы при этом требования, предъявляемые к точности?

13. Каковы основные принципы измерения погрешностей тахогенератора?

14. Как определяется класс точности тахогенератора?

§ 9.2. ТАХОГЕНЕРАТОР ПОСТОЯННОГО ТОКА

Тахогенератор постоянного тока представляет собой коллекторную электрическую машину постоянного тока с возбуждением либо от постоянного магнита (рис. 9.7, *а*), либо с помощью обмотки, расположенной на явновыраженных полюсах (рис. 9.7, *б*).

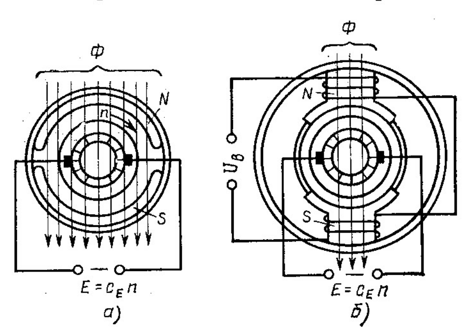


Рис. 9.7. Электромагнитная схема ТГ постоянного тока

Достоинства ТГ постоянного тока — отсутствие фазовой погрешности, малые габариты и масса по сравнению с ТГ переменного тока. Большим достоинством обладает ТГ постоянного тока с постоянными магнитами, так как для его возбуждения не требуется постоянный источник энергии.

По сравнению с ТГ переменного тока ТГ постоянного тока имеют и существенные недостатки: наличие скользящих контактов между коллектором и щетками, коммутационное искрение под щетками, необходимость устройства фильтров от радиопомех.

Конструкция ТГ постоянного тока с независимым возбуждением показана на рис. 9.8; конструкция ТГ постоянного тока с постоянными магнитами — на рис. 9.9.

Рассмотрим основные технические показатели ТГ постоянного тока. Уравнение выходной характеристики тахогенератора при на-

грузке с учетом падения напряжения в щеточном контакте может быть представлено в виде [1]

$$U=(c_E n-\Delta U_{щ})/(1+r_я/R_{нагр}), \qquad (9.4)$$

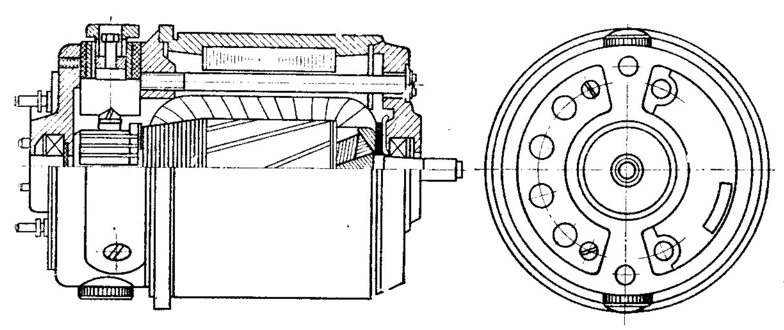


Рис. 9.8. Конструкция ТГ с независимым возбуждением

где c_E — коэффициент пропорциональности между ЭДС и частотой вращения при холостом ходе ($R_{нагр}=\infty$); $\Delta U_{щ}$ — падение напряжения в щеточном контакте; $r_я$ — сопротивление цепи якоря.

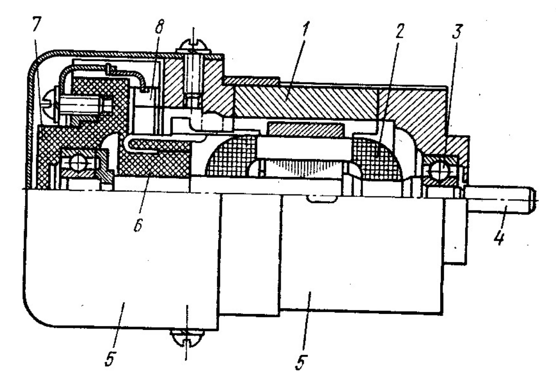


Рис. 9.9. Конструкция ТГ с постоянными магнитами:

1 — корпус с полюсами; *2* — якорь; *3* — подшипник; *4* — вал; *5* — кожух; *6* — коллектор; *7* — щит; *8* — щетки

В идеальном случае, при отсутствии реакции якоря и падения напряжения в щеточном контакте, выходная характеристика ТГ представляется прямой линией:

$$U_i=c_1 n, \qquad (9.5)$$

где $c_1=k_1\Phi/(1+r_я/R_{нагр})$, при этом k_1 — коэффициент пропорциональности между потоком, ЭДС и частотой вращения при нагрузке ТГ $R_{нагр}\neq\infty$.

Относительная погрешность ТГ

$$\Delta_U=(U_i-U)/U_i. \qquad (9.6)$$

Как и у асинхронного ТГ, качество работы ТГ постоянного тока определяется основными техническими показателями — линейностью и крутизной — и такими отличительными особенностями ТГ постоянного тока, как асимметрия выходного напряжения и зона нечувствительности.

В ТГ постоянного тока погрешности выходной характеристики обусловливаются главным образом действием реакции якоря, тем-

пературы, магнитной несимметрии. При максимальной рабочей частоте вращения у современных машин отечественного производства отклонение от линейности $\Delta_U = \pm(0{,}5 \div 3)\%$.

Номинальные рабочие частоты вращения у современных ТГ постоянного тока $n = 1000 \div 10\,000$ об/мин; наибольшее применение имеют ТГ с частотой вращения 1500 и 3000 об/мин.

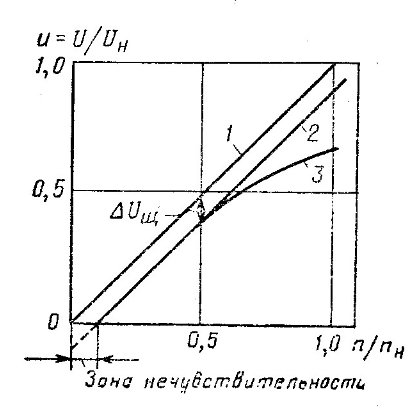


Рис. 9.10. Выходные характеристики ТГ постоянного тока:
1 — без учета $\Delta U_{щ}$; *2* — с учетом $\Delta U_{щ}$; *3* — с учетом влияния реакции якоря

Крутизна выходной характеристики у современных ТГ постоянного тока $k_U = 5 \div 100$ мВ/(об/мин) и выше (меньшие значения относятся к ТГ с постоянными магнитами).

Важные технические показатели качества работы ТГ постоянного тока — асимметрия выходного напряжения и наличие зоны нечувствительности. Асимметрия выходного напряжения представляет собой разность между выходными ЭДС (напряжением) при правом и левом направлениях вращения, обусловленную главным образом технологическими факторами и точностью установки щеток на нейтрали. В современных ТГ постоянного тока погрешность асимметрии составляет $\pm(1 \div 3)\%$.

В выходной характеристике $U = f(n)$ при малых частотах вращения имеется зона нечувствительности, в которой напряжение на зажимах ТГ с вращающимся якорем равна нулю, т. е. выходная характеристика смещается вправо (рис. 9.10). Это смещение обусловлено падением напряжения в щеточном контакте и при малых частотах вращения становится соизмеримым с ЭДС вращения [см. первый член в уравнении (9.4)]. Для устранения указанного недостатка применяют щетки с малым падением напряжения.

Цель исследования — изучение основных свойств ТГ постоянного тока с постоянными магнитами и с независимым возбуждением.

ПРОГРАММА РАБОТЫ

А. Экспериментальные исследования

1. Ознакомиться с конструкцией ТГ и его техническими данными.

2. Снять выходные характеристики: а) при холостом ходе $R_{нагр} = \infty$; б) при сопротивлении нагрузки $R_{нагр} = 500$ Ом в диапазоне рабочих частот вращения от 0 до $1{,}25 n_н$.

3. Определить зону нечувствительности.

4. Снять зависимость выходного напряжения от сопротивления нагрузки $U=f(R_{нагр})$ при $n=n_н$.

5. Определить асимметрию выходного напряжения $\Delta U_{ас}$, %.

Б. Расчеты и построения

1. Вычертить эскиз тахогенератора постоянного тока.

2. Построить выходные характеристики тахогенератора $U=f(n)$: а) при холостом ходе $R_{нагр}=\infty$; б) при сопротивлении нагрузки $R_{нагр}=500$ Ом для диапазона рабочих частот вращения от 0 до $1{,}25n_н$. Рассчитать крутизну k_U при $R_{нагр}=\infty$.

3. Показать на графиках $U=f(n)$ зону нечувствительности: а) при холостом ходе $R_{нагр}=\infty$; б) при сопротивлении нагрузки $R_{нагр}=500$ Ом.

4. Построить зависимость выходного напряжения от сопротивления нагрузки $U=f(R_{нагр})$ при $n=n_н$.

5. Рассчитать асимметрию выходного напряжения.

ПОЯСНЕНИЯ И УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

Схемы для испытания ТГ постоянного тока с постоянными магнитами и электромагнитным возбуждением представлены на рис. 9.11, *а, б* соответственно. Вольтметр для измерения выходного напряжения должен иметь большое сопротивление. При определении $R_{нагр}$ следует принимать в расчет сопротивление прибора $R_{пр}$:

$$R_{нагр}=RR_{пр}/(R+R_{пр}), \qquad (9.7)$$

где R — сопротивление магазина сопротивлений.

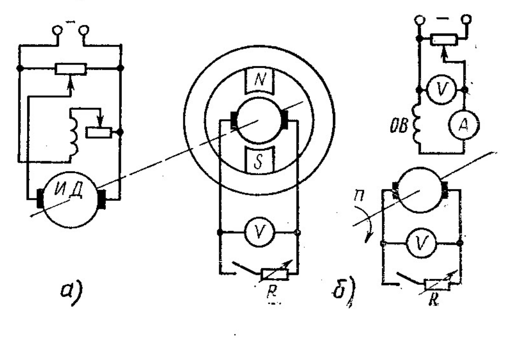


Рис. 9.11. Схемы для испытания ТГ постоянного тока

При выполнении работы необходимо ознакомиться с основными элементами конструкции ТГ по стендам и чертежам и нарисовать его эскиз.

При номинальной рабочей частоте вращения определяется выходное напряжение; крутизна выходной характеристики [мВ/(об/мин)]

$$k_U=U/n_н. \qquad (9.8)$$

Выходные характеристики, т. е. зависимости выходного напряжения на якорной обмотке от частоты вращения $U=f(n)$, снимаются при различных сопротивлениях нагрузки $R_{нагр}$: а) $R_{нагр}=\infty$ (в режиме холостого хода); б) $R_{нагр}=500$ Ом.

В ТГ с независимым возбуждением при получении выходной характеристики поддерживается постоянное напряжение возбуждения, равное номинальному. По характеристикам определяется крутизна k_U при $R_{нагр}=\infty$ и $R_{нагр}=500$ Ом.

При получении выходных характеристик следует наиболее тщательно выявить зависимость $U=f(n)$ в области малых частот вращения и определить протяженность зоны нечувствительности, в которой на выходе ТГ нет напряжения.

Асимметрия выходного напряжения ТГ постоянного тока определяется как отношение разности между значениями напряжения на генераторной обмотке при правом и левом направлениях вращения к среднему значению выходного напряжения (%):

$$\Delta U_{ас}=200\,(U_{прав}-U_{лев})/(U_{прав}+U_{лев}), \qquad (9.9)$$

где $U_{прав}$, $U_{лев}$ — выходное напряжение при правом и левом направлениях вращения якоря.

Асимметрия напряжения проверяется только при номинальной рабочей частоте вращения.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основными требованиями, предъявляемыми к точности ТГ постоянного тока, являются следующие: 1) линейность выходной характеристики; 2) минимальная асимметрия выходного напряжения при изменении направления вращения; 3) малое влияние на выходную характеристику изменения температуры и нагрузки; 4) минимум пульсаций напряжения на коллекторе.

Из анализа уравнения (9.4) следует, что при уменьшении сопротивления нагрузки зависимость выходного напряжения от частоты вращения отклоняется от линейной. Основные причины нарушения линейности выходной характеристики — реакция якоря и падение напряжения в якорной цепи, которые возрастают с увеличением тока нагрузки (при уменьшении $R_{нагр}$). Следовательно, точность ТГ постоянного тока возрастает с увеличением сопротивления нагрузки.

Падение напряжения в щеточном контакте при малых частотах вращения может быть соизмеримо с индуцируемой в якоре ЭДС. Это приводит к смещению выходной характеристики, т. е. к образованию зоны нечувствительности (от $n=0$ до $n=n_{мин}$), где выходное напряжение равно нулю.

Границу зоны нечувствительности характеризует частота вращения

$$n_{мин}=\Delta U_{щ}/(c_E\Phi). \qquad (9.10)$$

Для уменьшения зоны нечувствительности применяют мягкие щетки с малым $\Delta U_{щ}$ (например, медно-графитовые, серебряно-графитовые, в прецизионных тахогенераторах применяют щетки с серебряными и золотыми напайками). Вследствие неточной установки щеток на геометрической нейтрали, а также смещения их при эксплуатации возникает несимметрия выходного напряжения при изменении направления вращения якоря. У современных ТГ асимметрия не превышает 1—3%.

Отклонение от линейного закона зависимости выходного напряжения от частоты вращения связано также с изменением потока возбуждения при изменениях температуры окружающей среды. Особенно чувствительны к влиянию температуры ТГ с электромагнитным возбуждением. В них при изменении температуры обмотки возбуждения меняется ток возбуждения, а следовательно, и поток. Чтобы уменьшить влияние температуры, магнитную систему ТГ следует выполнить сильно насыщенной. Однако это приводит к увеличению размагничивающего действия реакции якоря, поэтому в ТГ со сравнительно большими токами в якоре это недопустимо.

В ТГ с постоянными магнитами температура окружающей среды практически не влияет на магнитный поток постоянных магнитов.

Одна из основных погрешностей ТГ постоянного тока — пульсации выходного напряжения (коллекторные, зубцовые и якорные). Причины возникновения пульсаций выходного напряжения связаны чаще всего с эксцентриситетом и эллиптичностью якоря, неравномерностью частоты вращения, остаточным магнетизмом, неоднородностью магнитных свойств материала якоря в разных направлениях, вибрацией щеток и др. В зависимости от характера пульсаций применяются различные средства для уменьшения их: 1) для якорных пульсаций — увеличение воздушного зазора, «веерная» сборка пакета, точность изготовления якоря; 2) для зубцовых — скос пазов, правильный выбор числа пазов и ширины полюсного наконечника, применение магнитных клиньев; 3) для коллекторных — выбор большого числа коллекторных пластин, надежная конструкция, правильный выбор типа щеток и уход за ними.

Сравнительная оценка свойств двух типов ТГ постоянного тока позволяет выявить следующие преимущества ТГ с постоянными магнитами: 1) отсутствие источника постоянного тока для возбуждения; 2) меньшие габариты; 3) отсутствие влияния температуры на магнитный поток.

Тахогенератор постоянного тока в сравнении с асинхронным (см. § 9.1) имеет важное преимущество — отсутствие фазовой погрешности. Однако наличие коллектора и щеток снижает точность ТГ постоянного тока. Кроме того, ТГ постоянного тока являются источниками радиопомех и щеточных шумов.

Вопросы для самопроверки

1. Назовите способы возбуждения ТГ постоянного тока.
2. Зависит ли вид выходной характеристики ТГ от тока якоря? Изобразить графически.
3. С какой системой возбуждения целесообразнее применять ТГ постоянного тока при изменении окружающей температуры и почему?
4. Как влияет ток в якоре ТГ постоянного тока на крутизну выходной характеристики?
5. Сформулируйте требования к щеткам ТГ постоянного тока.
6. Что такое зона нечувствительности у ТГ постоянного тока и как ее уменьшить?
7. Перечислите сравнительные достоинства и недостатки ТГ с постоянными магнитами и с электромагнитным возбуждением.

8. Что такое асимметрия ТГ постоянного тока? Укажите способы ее уменьшения.

9. Чем обусловлены пульсации выходного напряжения ТГ постоянного тока? Как их уменьшить?

10. Какие виды погрешностей ТГ постоянного тока зависят от типа щеток?

§ 9.3. СЕЛЬСИНЫ

На практике часто возникает необходимость синхронизации вращения или поворота различных осей механизмов, находящихся на расстоянии. Эта задача обычно решается с помощью электрических систем синхронной связи. Системой синхронной связи называется такая электрическая связь, которая обеспечивает одновременный поворот или одновременное вращение двух или нескольких механически не связанных между собой осей механизмов. В технике получили распространение два основных вида систем синхронной связи: система синхронного вращения («электрического вала») и система синхронного поворота («передачи угла»).

Системы «электрического вала» чаще всего выполняются с помощью трехфазных асинхронных машин с фазным ротором. Мощность используемых в системе двигателей определяется моментами сопротивления, которыми нагружены синхронизирующиеся оси.

Системы синхронной «передачи угла» обычно используются для дистанционного управления, регулирования и контроля и выполняются, как правило, с помощью небольших индукционных электрических машин, называемых сельсинами (selfsin — самосинхронизирующийся).

В зависимости от числа фаз первичной обмотки — обмотки возбуждения и числа фаз питающей сети — сельсины делятся на трех- и однофазные.

Трехфазные сельсины, конструктивно не отличающиеся от асинхронных машин с фазным ротором малой мощности, применяются редко вследствие малой устойчивости и неравенства синхронизирующих моментов при повороте ротора в различных направлениях.

В большинстве систем синхронной передачи угла используются однофазные сельсины, у которых имеются однофазная обмотка возбуждения и трехфазная обмотка синхронизации.

В схемах автоматики используются две принципиально отличные системы синхронной передачи угла: индикаторная и трансформаторная.

Индикаторная система применяется в тех случаях, когда момент сопротивления на ведомой оси мал или совсем отсутствует (ось нагружена шкалой, стрелкой и т. п.). При этом сельсин-приемник самостоятельно отрабатывает задаваемый сельсином-датчиком угол. Трансформаторная система применяется в тех случаях, когда на ведомой оси имеется значительный момент сопротивления. При этом сельсин-приемник отрабатывает задаваемый угол не самостоятельно, а с помощью механически и электрически связанного с ним исполнительного двигателя.

По конструкции однофазные сельсины делятся на контактные и бесконтактные.

В контактных сельсинах одна из обмоток (обмотка возбуждения *ОВ* или обмотка синхронизации *ОС*) располагается на вращающемся роторе (рис. 9.12, *а*—*в*). Электрическая связь с этой обмоткой осуществляется с помощью скользящих контактов: колец и щеток.

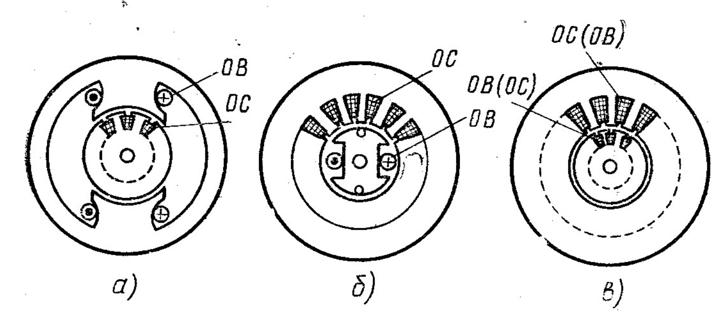


Рис. 9.12. Конструктивные схемы контактных сельсинов

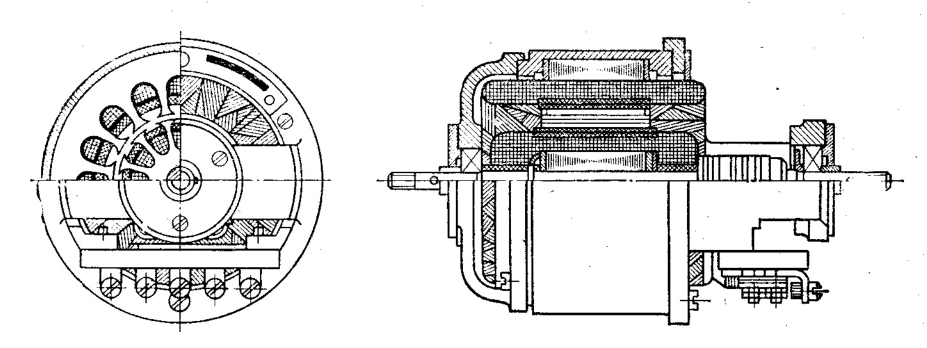


Рис. 9.13. Конструкция контактного сельсина

По своему устройству контактные сельсины (рис. 9.13) практически не отличаются от обычных трехфазных синхронных машин малой мощности. Они могут быть как явнополюсными (индикаторные сельсины), так и неявнополюсными (трансформаторные сельсины). В явнополюсных сельсинах однофазная обмотка возбуждения сосредоточенная — она располагается на явновыраженных полюсах статора или ротора. В неявнополюсных сельсинах однофазная обмотка возбуждения распределенная — она располагается в полузакрытых пазах статора или ротора. Трехфазная обмотка синхронизации всегда выполняется распределенной и располагается в пазах соответственно ротора или статора. Фазы обмотки синхронизации обычно соединяются в звезду. Магнитное поле сельсина переменное, поэтому для уменьшения потерь от вихревых токов пакеты статора и ротора набираются из изолированных листов электротехнической стали.

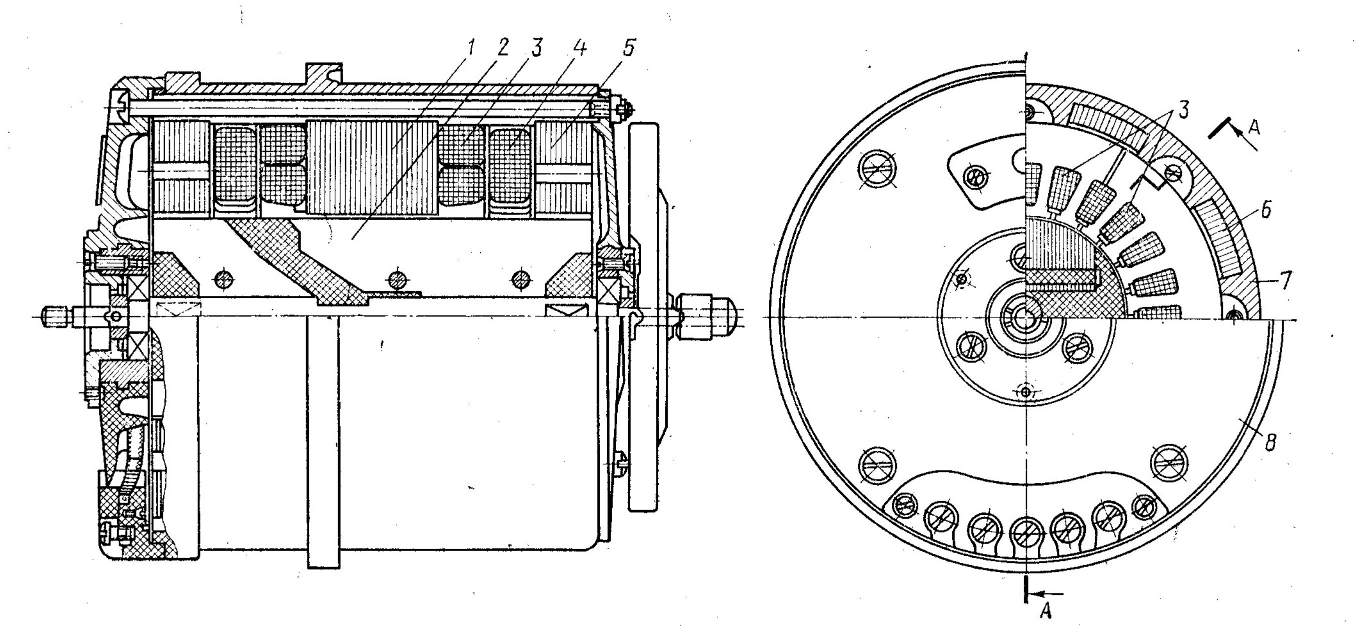


Рис. 9.14. Конструкция бесконтактного сельсина

Для увеличения надежности контакта и уменьшения его переходного сопротивления кольца и щетки обычно изготовляются из сплавов серебра. Число контактных пар (колец и щеток) зависит от места расположения обмоток: в сельсинах с обмоткой возбуждения на роторе — две контактные пары, в сельсинах с обмоткой синхронизации на роторе — три контактные пары.

Большой недостаток контактных сельсинов, ограничивающий их применение в схемах синхронной связи,— наличие скользящих контактов, переходное сопротивление которых может значительно

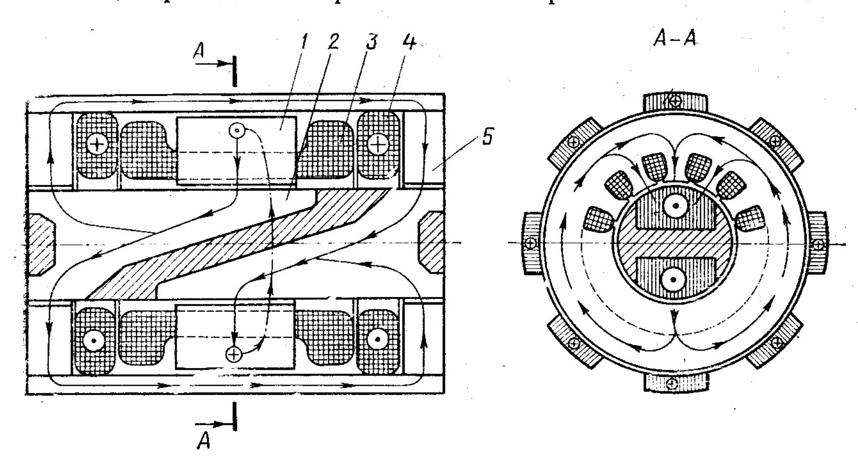


Рис. 9.15. Схема магнитной цепи бесконтактного сельсина

изменяться. Переходное сопротивление можно снизить, а его стабильность — повысить, увеличивая силы нажатия щеток на кольца. Однако последнее недопустимо вследствие того, что оно вызывает увеличение момента трения щеток о кольца, а следовательно, и погрешности в работе сельсинов, особенно в индикаторных схемах синхронной связи.

Для повышения качества работы системы синхронной связи советскими учеными А. Г. Иосифьяном и Д. В. Свечарником были предложены сельсины, не имеющие скользящих контактов,— бесконтактные.

Бесконтактный сельсин (БС), так же как контактный, имеет две обмотки: однофазную обмотку возбуждения и трехфазную обмотку синхронизации. Обе обмотки располагаются неподвижно, поэтому отпадает необходимость в скользящих контактах.

Основными частями БС (рис. 9.14, 9.15) являются статор *1*, ротор *2*, тороиды *5*, внешний магнитопровод *6*, обмотка возбуждения *4*, обмотка синхронизации *3*, корпус *7*, крышки (подшипниковые щиты) *8*.

Статор БС практически не отличается от статора обычной синхронной или асинхронной машины. Его пакет набирается из изолированных листов электротехнической стали. В пазах статора располагается соединенная в звезду трехфазная обмотка синхрониза-

ции. Ротор БС имеет два полюса, разделенных немагнитным промежутком. Полюса ротора набираются из изолированных листов электротехнической стали, располагающихся в аксиальном направлении и укрепляющихся на оси посредством заливки алюминием, который является основным крепящим материалом ротора. Тороиды набираются из изолированных листов электротехнической стали, имеющих форму колец. К наружной цилиндрической поверхности тороидов примыкают стержни внешнего магнитопровода, набранные из изолированных листов стали и расположенные в аксиальных пазах корпуса. В торцовой части корпус сочленяется с подшипниковыми щитами. Однофазная обмотка возбуждения БС выполняется в виде двух катушек, имеющих форму колец. Катушки обмотки возбуждения располагаются неподвижно между статором (лобовыми частями его обмотки) и тороидами.

Рассмотрим принцип действия бесконтактного сельсина, проследив путь его основного магнитного потока, который создается переменным током обмотки возбуждения. Пусть в данный момент времени поток в роторе направлен справа налево (рис. 9.15). Чтобы замкнуться вокруг создающих его обмоток возбуждения, потоку необходимо пройти из правого полюса ротора в левый. Однако между полюсами ротора имеется немагнитный промежуток, который оказывает потоку большое сопротивление. Вследствие этого поток устремляется в обход промежутка — он проходит воздушный зазор между правым полюсом ротора и статором, по зубцам и спинке статора, воздушному зазору между статором и левым полюсом ротора. Попав в левый полюс ротора, поток через воздушный зазор проходит в левый тороид, затем в стержни внешнего магнитопровода, правый тороид и, пройдя через воздушный зазор между правым тороидом и ротором, замыкается в правом полюсе ротора. Проходя по статору, магнитный поток обмотки возбуждения сцепляется с обмоткой синхронизации. Тем самым выполняется условие, необходимое для работы сельсина,— магнитная связь двух обмоток. Магнитная связь обмотки возбуждения с той или иной фазой обмотки синхронизации зависит от положения ротора сельсина, не имеющего никаких обмоток.

Отсутствие скользящих контактов значительно увеличивает надежность работы и стабильность характеристик бесконтактных сельсинов по сравнению с контактными.

К недостаткам БС относятся сложность их конструкции, повышенная стоимость и низкий $\cos\varphi$, обусловленный наличием на пути магнитного потока большого магнитного сопротивления (четыре воздушных зазора).

В системах синхронной связи, рассчитанных на работу от сетей с повышенной частотой (400, 500, 1000 Гц), применяются бесконтактные сельсины с кольцевым трансформатором (рис. 9.16). Они отличаются от контактных сельсинов тем, что в них напряжение на обмотку возбуждения, которая расположена на роторе, подается с помощью кольцевого трансформатора, заменяющего кольца и щетки. Обмотка синхронизации *1* сельсина располагается в пазах ста-

тора 2, обмотка возбуждения 3 — в пазах ротора 4 или на его полюсах. Первичная обмотка 5 кольцевого трансформатора располагается на статоре, а вторичная 6 — на роторе. Обмотки 5, 6 имеют вид колец и размещаются в магнитной системе кольцевого трансформатора, состоящей из кольцевых магнитопроводов статора 7, 8 и ротора 9, 10, которые на роторе соединяются внутренним магнитопроводом 11, а на статоре — внешним магнитопроводом 12. Кольцевые магнитопроводы шихтуются из листов электротехнической стали, а внутренние и внешние магнитопроводы обычно изготовляются из металлокерамики. Путь магнитного потока Ф кольцевого трансформатора, передающего энергию из первичной обмотки во вторичную, показан на рис. 9.16.

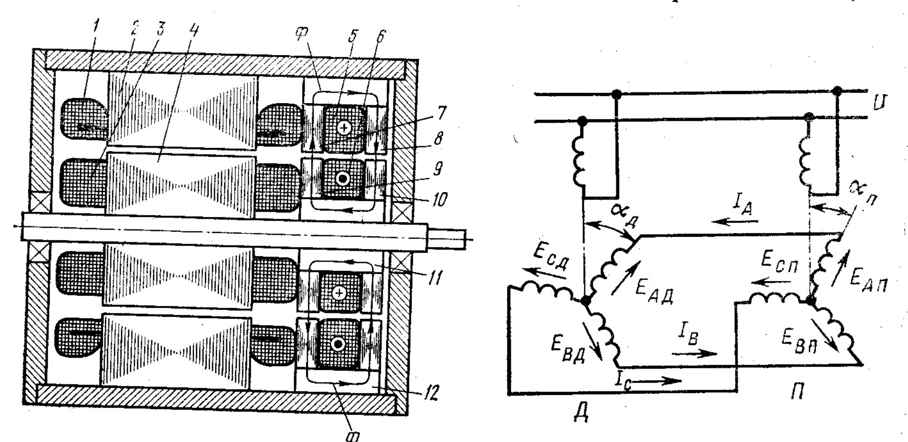


Рис. 9.16. Конструкция бесконтактного сельсина с кольцевым трансформатором

Рис. 9.17. Схема индикаторной синхронной связи

Простейшая индикаторная схема синхронной связи состоит из двух одинаковых сельсинов и линии связи (рис. 9.17). Один из сельсинов называется *датчиком Д*, другой — *приемником П*. Поворотом ротора сельсина-датчика задается тот или иной угол $\alpha_д$; ротор приемника при этом следует за ротором датчика — отрабатывает заданный угол $\alpha_п = \alpha_д$.

При работе сельсинов в индикаторном режиме синхронной связи обмотки возбуждения обоих сельсинов подключаются к одной и той же однофазной сети переменного тока. Концы фаз обмоток синхронизации приемника и датчика соединяются друг с другом. Переменный ток, проходящий по однофазным обмоткам возбуждения сельсинов, создает в каждом из них пульсирующее магнитное поле, которое наводит в соответствующих фазах обмотки синхронизации ЭДС. Значение ЭДС той или иной фазы обмотки синхронизации зависит от положения ее по отношению к обмотке возбуждения сельсина. Если роторы приемника и датчика расположены одинаково по отношению к соответствующим обмоткам возбуждения, то в соединенных между собой линией связи фазах обмоток синхронизации

приемника и датчика индуцируются одинаковые ЭДС, которые уравновешивают друг друга — ток в обмотках синхронизации и линии связи отсутствует. Такое положение сельсинов называется *согласованным.*

Если ротор датчика поворотом на некоторый угол вывести из согласованного положения, то равенство ЭДС нарушится: по обмоткам синхронизации и линии связи потечет ток. В результате взаимодействия этого тока с магнитными потоками обмоток возбуждения возникнут вращающие моменты, которые будут стремиться повернуть роторы приемника и датчика в согласованное положение. Ротор датчика бывает обычно заторможен, а ротор приемника — свободен, поэтому под действием вращающего момента он поворачивается до тех пор, пока не придет в согласованное с ротором датчика положение. Таким образом, с помощью индикаторной схемы синхронной связи осуществляется дистанционная передача угла.

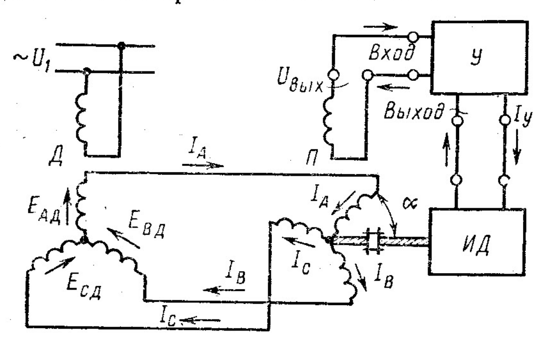


Рис. 9.18. Схема трансформаторной синхронной связи

В данной работе исследуется простейшая система синхронной связи, состоящая из одного приемника и датчика. В схемах автоматики часто встречаются более сложные системы, в которых от одного датчика работают несколько (до 30 и более) приемников. В таких системах в качестве датчика используются более мощные сельсины.

Точность работы сельсинов в индикаторных схемах синхронной связи зависит от ряда факторов. Важнейшими из них являются: удельный синхронизирующий момент — момент, развиваемый приемником при угле рассогласования в 1°; момент трения приемника и момент сопротивления на его валу; сопротивление линии связи; магнитная и электрическая асимметрия; число приемников, работающих от одного датчика; небаланс ротора приемника; напряжение и частота питающей сети.

Простейшая трансформаторная схема синхронной связи состоит из двух сельсинов — приемника *П* и датчика *Д*, усилителя *У* и исполнительного двигателя *ИД*, механически связанного с осью ротора сельсина-приемника (рис. 9.18).

Обмотка возбуждения сельсина-датчика, работающего в трансформаторной схеме, подключается к однофазной сети переменного тока. Ток этой обмотки создает пульсирующее магнитное поле, которое, сцепляясь с обмоткой синхронизации датчика, наводит в ее фазах ЭДС. Так как обмотка синхронизации датчика соединена линией связи с обмоткой синхронизации приемника, то по обеим об-

моткам и линии связи течет ток. Этот ток, проходя по обмотке синхронизации приемника, создает в магнитной цепи приемника пульсирующее магнитное поле, которое, сцепляясь с обмоткой возбуждения приемника, наводит в ней ЭДС — выходное напряжение приемника $U_{вых}$.

Направление магнитного потока обмотки синхронизации приемника зависит от взаимного расположения роторов приемника и датчика. Если закрепить ротор приемника и поворачивать ротор датчика, то синхронно с ротором датчика будет поворачиваться магнитное поле приемника. Одновременно будет изменяться по закону синуса выходное напряжение приемника.

Согласованным положением сельсинов в трансформаторной схеме синхронной связи называется положение, при котором выходное напряжение сельсина-приемника равно нулю. При этом соединенные между собой фазы обмоток синхронизации датчика и приемника (в отличие от согласованного положения сельсинов в индикаторной схеме) не занимают одинакового положения по отношению к соответствующим обмоткам возбуждения. Положение обмотки синхронизации датчика отличается от положения обмотки синхронизации приемника на 90°.

Рассмотрим принцип действия трансформаторной схемы синхронной связи. При повороте ротора сельсина-датчика на некоторый угол из согласованного положения на выходной обмотке сельсина-приемника, а следовательно, и на входе усилителя появляется напряжение. После преобразования усилителем это напряжение подается на обмотку управления ИД, ротор которого начинает вращаться, поворачивая при этом ротор сельсина-приемника. Роторы двигателя и приемника вращаются до тех пор, пока ротор приемника не повернется на заданный датчиком угол и сельсины не придут в согласованное положение, при котором выходные напряжения на усилителе и на обмотке управления ИД станут равными нулю.

Качество работы сельсинов в трансформаторной схеме синхронной связи зависит от ряда факторов, важнейшими из которых являются следующие: остаточное напряжение — напряжение на выходной обмотке приемника в согласованном положении; удельное выходное напряжение — напряжение при угле рассогласования в 1°; удельная выходная мощность — мощность, которую может отдать выходная обмотка приемника при угле рассогласования в 1°; электрическая и магнитная асимметрия; сопротивление линии связи; количество сельсинов-приемников.

Цель исследования — ознакомление с характеристиками и погрешностями сельсинов в индикаторном и трансформаторном режимах работы.

ПРОГРАММА РАБОТЫ

А. Экспериментальные исследования

1. Ознакомиться с конструкцией сельсинов и их паспортными данными.

2. Произвести исследования работы сельсинов в индикаторном режиме:

а) снять кривую погрешностей $\Delta\alpha = f(\alpha)$, определить удельный синхронизирующий момент $M_{уд}$ и время успокоения сельсина-приемника $t_у$;

б) определить критический угол рассогласования сельсина-приемника при работе без демпфера;

в) снять зависимости синхронизирующего момента M, токов в линии связи I_A, I_B, I_C, мощностей $P_{в.п}$, $P_{в.д}$ и токов $I_{в.п}$, $I_{в.д}$ возбуждения приемника и датчика от угла рассогласования α.

3. Произвести исследование работы сельсинов в трансформаторном режиме:

а) определить остаточное напряжение и ошибку асимметрии;

б) снять кривую погрешностей $\Delta\alpha = f(\alpha)$;

в) снять зависимости выходного напряжения сельсина-приемника $U_{вых}$, токов в линии связи I_A, I_B, I_C, мощности $P_{в.д}$ и тока возбуждения датчика $I_{в.д}$ от угла рассогласования α при сопротивлениях нагрузки $R = 500$ Ом и $R = \infty$.

Б. Расчеты и построения

1. Вычертить эскиз бесконтактного сельсина в продольном разрезе, показав стрелками одну из магнитных силовых линий.

2. Построить кривые погрешностей сельсина-приемника в индикаторном и трансформаторном режимах $\Delta\alpha = f(\alpha)$.

3. Для индикаторного режима работы сельсинов построить зависимости M, $I_{в.п}$, $P_{в.п}$, I_A, I_B, I_C от α.

4. Для трансформаторного режима работы сельсинов построить зависимости $U_{вых}$, $P_{в.д}$, $I_{в.д}$ от α при $R = 500$ Ом и $R = \infty$.

5. Рассчитать удельную выходную мощность $P_{вых.уд}$ и удельное выходное напряжение $U_{вых.уд}$ сельсина-приемника в трансформаторном режиме.

ПОЯСНЕНИЯ И УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

В работе исследуются два режима работы сельсинов: индикаторный и трансформаторный.

Исследование работы сельсинов в индикаторном режиме. Кривая погрешностей $\Delta\alpha = f(\alpha)$ снимается при включении сельсинов по схеме, изображенной на рис. 9.19. На обмотку возбуждения приемника и датчика подается номинальное напряжение, которое поддерживается постоянным во время опыта.

До начала опыта необходимо проверить, совпадает ли нуль шкалы датчика с нулевым показанием стрелки приемника. Если этого совпадения нет, его необходимо добиться путем поворота корпусов приемника или датчика. Постепенным поворотом ротора датчика задаются углы от 0 до 360° (через каждые 10°), при этом записываются углы поворота роторов приемника и датчика. Разность между показаниями приемника и датчика, выраженная в градусах, представляет собой погрешность системы $\Delta\alpha = \alpha_п - \alpha_д$.

Кривую погрешности (рис. 9.20) желательно снимать дважды: при вращении ротора датчика по часовой стрелке и против. Именно так определяется погрешность сельсинов на заводах-изготовителях.

Точность сельсина определяется как среднее арифметическое значение максимальной положительной и максимальной отрицательной погрешности. В зависимости от значения погрешности индикаторные сельсины-приемники разделяются на четыре класса точности: I класс имеет погрешность от 0 до 30′; II — от 30 до 45′; III — от 45 до 60′; IV — от 60 до 90′.

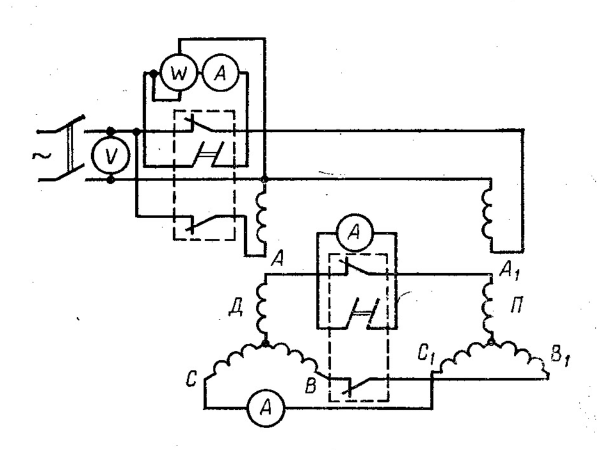


Рис. 9.19. Схема соединений для испытания сельсинов в индикаторном режиме

Удельный синхронизирующий момент определяется при включении сельсинов по схеме, используемой в предыдущем опыте.

Удельным синхронизирующим моментом сельсина - приемника называется синхронизирующий момент, приходящийся на 1° угла рассогласования. Обычно синхронизирующий момент сельсина определяется с помощью шкива и нити с грузом. На оси сельсина-приемника укрепляется шкив. Вокруг шкива накручивается нить, на которой подвешивается груз. Ротор датчика закрепляется в нулевом положении. Ротор приемника согласовывается с ротором датчика (при согласовании нить с грузом снимается). Посредством груза, подвешенного на нити, ротор приемника выводится из согласованного положения. Стрелка приемника показывает угол рассогласования. Произведение массы груза на радиус шкива определяет синхронизирующий момент.

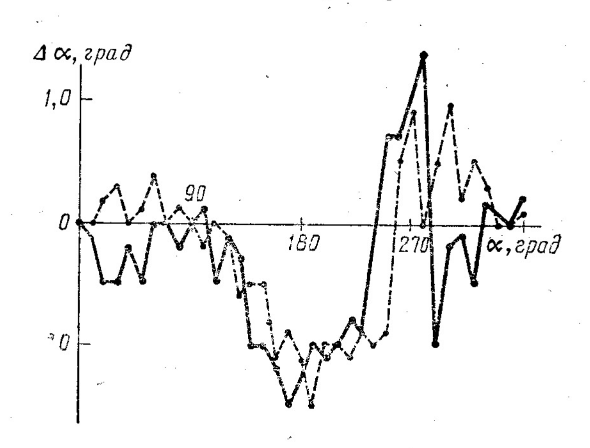


Рис. 9.20. Кривые погрешностей бесконтактного сельсина в индикаторном режиме:
——— по часовой стрелке; — — — — против часовой стрелки

Удельный синхронизирующий момент находится делением синхронизирующего момента при рассогласовании 5—10° соответственно на 5—10, например

$$M_{\text{уд}} = M_{5°}/5 = G_5 \cdot R/5.$$

Для точного определения удельного синхронизирующего момента необходимо произвести измерение 2—4 раза, рассогласовывая сельсины в обе стороны от нулевого положения. Во время опыта необходимо поддерживать напряжение на обмотках возбуждения приемника и датчика постоянным, равным номинальному.

Для определения времени успокоения сельсина-приемника приемник и датчик устанавливаются в согласованное положение. Ротор датчика закрепляется. Выключается напряжение питания. Стрелка приемника устанавливается на 179 или 181°. Затем систему включают на номинальное напряжение и одновременно запускают секундомер.

Время, в течение которого ротор приемника колеблется, приходя в согласованное положение, называется *временем успокоения сельсина-приемника*. Для точного определения времени успокоения опыт следует проделать 2—4 раза.

Критический угол рассогласования приемника определяется только на установке с сельсинами-приемниками, у которых нет внутреннего демпфера. Для проведения этого испытания с сельсина-приемника снимается внешний демпфер. Ротор датчика закрепляется в нулевом положении. Используется схема соединения предыдущего опыта.

Поворотом стрелки приемника достигается рассогласование на некоторый угол. Затем стрелка опускается и ротор приемника успокаивается — приходит в согласованное положение. Минимальный угол рассогласования, при котором ротор, будучи отпущен, не успокаивается, а начинает вращаться, называется критическим углом рассогласования. Опыт по определению критического угла следует начинать при рассогласовании сельсинов на 1—2°, увеличивая угол рассогласования каждый раз на 1°. Останавливать вращающийся ротор следует путем выключения питания.

Не следует допускать даже кратковременной работы сельсина в режиме асинхронного вращения. Это вызывает перегрев обмоток и механический износ подшипников.

После опыта демпфер нужно поставить на место.

Зависимости синхронизирующего момента M, токов в линии связи I_A, I_B, I_C, мощности и токов, потребляемых приемником и датчиком, $P_{\text{в.п}}$, $P_{\text{в.д}}$, $I_{\text{в.п}}$, $I_{\text{в.д}}$ от угла рассогласования α определяются по схеме, изображенной на рис. 9.19. Напряжение на обмотках возбуждения сельсина-датчика и сельсина-приемника в течение опыта поддерживается постоянным, равным номинальному. До начала опыта необходимо согласовать сельсины в нулевом положении. Первая запись показаний приборов производится в согласованном положении. Затем с помощью шкива и нити с грузом задается угол рассогласования от 0 до 180° через каждые 15—20° и производится

запись показаний приборов и значения момента. Необходимо зафиксировать угол рассогласования, который соответствует максимальному моменту.

При определении максимального момента, а также при снятии кривой момента после ее прохождения через максимум необходимо двумя пальцами руки ограничивать разбег стрелки. Во избежание чрезмерного перегревания сельсинов все испытания следует проводить быстро, особенно при углах рассогласования от 30 до 180°. Примерный вид кривых представлен на рис. 9.21.

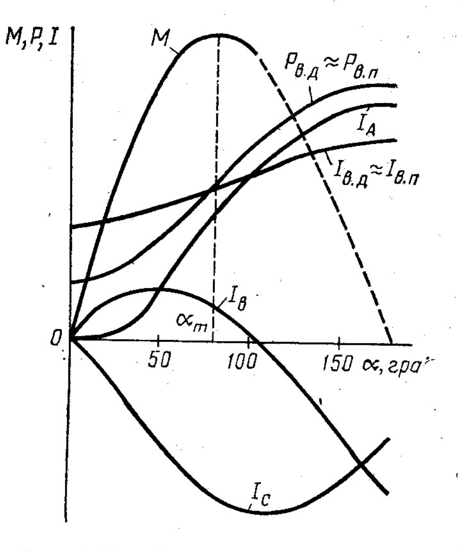


Рис. 9.21. Экспериментальные кривые зависимостей синхронизирующего момента M, токов в линии связи I_A, I_B, I_C, мощности $P_{в.п}$ и тока $I_{в.п}$, потребляемых обмоткой возбуждения приемника от угла рассогласования α в индикаторном режиме, полученные при испытании бесконтактного сельсина

Исследование работы сельсинов в трансформаторном режиме. Для определения остаточного напряжения, ошибки асимметрии и точности сельсины соединяются по схеме, изображенной на рис. 9.22, которая получается из индикаторной схемы отключением обмотки возбуждения приемника от питающей сети и подключением ее к высокоомному вольтметру или катодному осциллографу. Обмотка возбуждения сельсина-датчика по-прежнему питается от сети номинальным напряжением .

Для определения остаточного напряжения ротор сельсина-приемника поворачивается до тех пор, пока осциллограф, подключенный к обмотке возбуждения приемника (в данном случае она является выходной), не покажет минимального напряжения. В этом положении ротора с помощью вольтметра измеряется напряжение на выходной обмотке. Это и будет остаточное напряжение. Чтобы обеспечить безопасность вольтметра, его подключают лишь тогда, когда с помощью осциллографа на выходной обмотке установлено минимальное напряжение.

Для определения ошибки асимметрии корпус сельсина-приемника фиксируется в положении, при котором нулю шкалы датчика и нулю стрелки приемника соответствует минимум выходного напряжения. Затем ротор приемника с помощью стрелки поворачивается на 180°. Если сельсин не имеет асимметрии, то в этом положении ротора выходное напряжение сельсина снова будет минимальным. При наличии асимметрии ротор приходится поворачивать на некоторый угол в ту или иную сторону от 180°, с тем чтобы добиться ми-

нимального напряжения. Значение этого угла, выраженное в градусах, и является ошибкой асимметрии.

Точность сельсинов в трансформаторном режиме определяется следующим образом. Ротор сельсина-датчика фиксируется на нуле шкалы. Корпус сельсина-приемника фиксируется в положении, при котором нулевому положению стрелки приемника соответствует минимальное выходное напряжение. Затем ротор датчика поворачивается на 20° и снова фиксируется. Стрелка приемника вместе с ротором поворачивается также на 20°. В этом положении снова должен быть минимум выходного напряжения. Если его нет, то он достигается поворотом ротора приемника в ту или иную сторону от 20°. Отклонение стрелки от 20° определяет погрешность сельсина-приемника в данном положении ротора датчика. Знак погрешности определяется так же, как и у сельсинов в индикаторном режиме: показание стрелки приемника плюс погрешность должно быть равно показанию датчика.

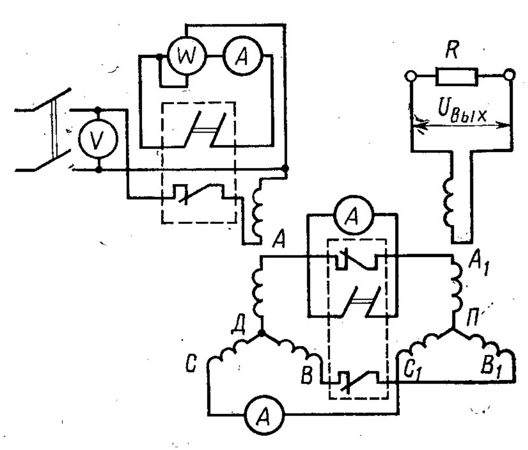


Рис. 9.22. Схема соединений для испытания сельсинов в трансформаторном режиме

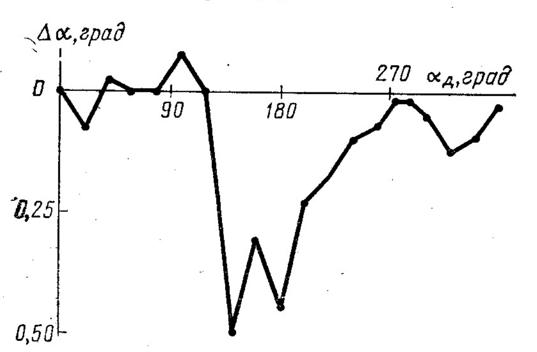


Рис. 9.23. Кривые погрешностей бесконтактного сельсина в трансформатором режиме

Повторяя описанную процедуру через каждые 20° в диапазоне от 0 до 360°, получим зависимость погрешности от угла поворота ротора датчика (рис. 9.23). Для более точного определения погрешности следует пользоваться катодным осциллографом, который позволяет лучше фиксировать минимум выходного напряжения. Точность сельсина определяется как полусумма абсолютных значений максимальной положительной и максимальной отрицательной погрешностей.

В зависимости от значения погрешности приемника трансформаторные сельсины делятся на семь классов точности: I — ±1′; II — ±2′; III — ±3′; IV — ±5′; V — ±10′; VI — ±20′; VII — 30′.

Для определения зависимости выходного напряжения $U_{вых}$, токов в линии связи I_A, I_B, I_C, мощности и тока, потребляемых обмоткой возбуждения датчика, $P_{в.д}$, $I_{в.д}$ от угла рассогласования α при различных сопротивлениях нагрузки используется схема соединения предыдущих опытов. Вначале ротор сельсина-датчика устанавливается в нулевое положение. Ротор сельсина-приемника жест-

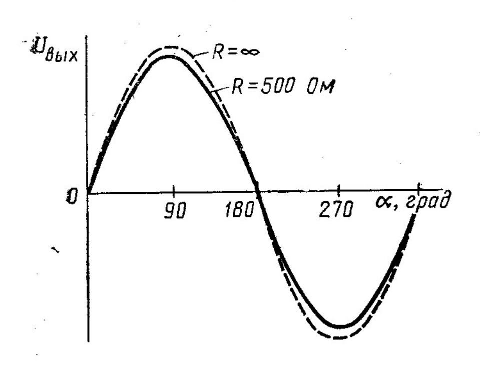


Рис. 9.24. Зависимость выходного напряжения сельсина-приемника с явновыраженными полюсами $U_{вых}$ от угла рассогласования α при различных сопротивлениях нагрузки

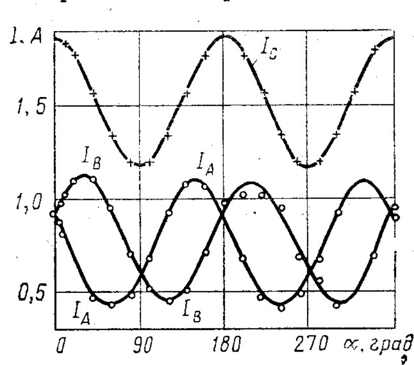


Рис. 9.25. Зависимость токов в линии связи от угла рассогласования сельсинов с явновыраженными полюсами в трансформаторном режиме

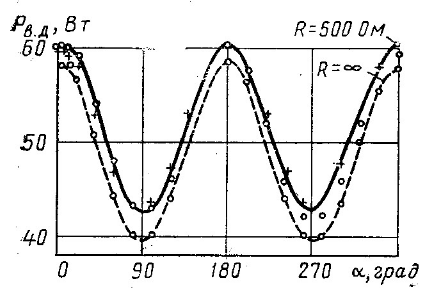


Рис. 9.26. Зависимости мощности, потребляемой датчиком от угла рассогласования сельсинов с явновыраженными полюсами в трансформаторном режиме при различных сопротивлениях нагрузки

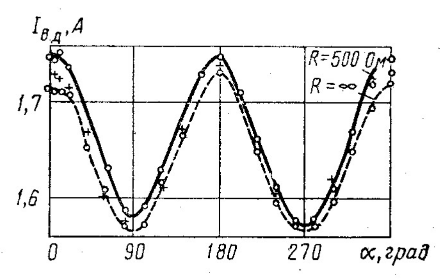


Рис. 9.27. Зависимости тока возбуждения датчика от угла рассогласования сельсинов с явновыраженными полюсами в трансформаторном режиме при различных сопротивлениях нагрузки

ко фиксируется в положении, при котором его выходное напряжение минимально. В этом положении записывается первое показание приборов. Затем ротор датчика поворачивается на 5, 10, 20, 40, 60° и далее до 360° через каждые 20° от первоначального положения и в каждом из этих положений записываются показания приборов и строятся выходные характеристики (рис. 9.24 — 9.27).

Опыт производится дважды: при сопротивлении нагрузки $R=\infty$ и $R=500$ Ом, где R — сопротивление, подключаемое к выходной обмотке приемника.

После окончания экспериментов необходимо определить удельное выходное напряжение $U_{вых.уд}$ и удельную выходную мощность $P_{вых.уд}$. Удельное выходное напряжение определяется делением выходного напряжения при угле рассогласования 5 или 10° соответственно на 5 или 10:

$$U_{вых.уд}=U_{вых5°}/5\approx U_{вых10°}/10.$$

Удельная выходная мощность определяется делением выходной мощности при угле рассогласования 5 или 10° на 5 или 10:

$$P_{вых}=U^2_{вых}/R_н;\ P_{вых.уд}=P_{вых5°}/5\approx P_{вых10°}/10.$$

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Погрешность сельсина-приемника, работающего в индикаторном режиме, зависит от ряда факторов. При исследовании сельсинов по программе данной работы напряжение и частота питающей сети поддерживаются постоянными; сопротивление линии связи вследствие малой ее длины близко к нулю; от датчика работает лишь один приемник; ротор сельсина-приемника статически сбалансирован. Это значит, что перечисленные факторы не влияют в данном случае на погрешность синхронной передачи. Удельный синхронизирующий момент во время эксплуатации не изменяется.

Характер кривой погрешностей $\Delta\alpha=f(\alpha)$ здесь (см. рис. 9.20) определяется в основном магнитной и электрической асимметрией, а также моментом трения. В контактных сельсинах момент трения значителен, вследствие чего кривые погрешностей $\Delta\alpha=f(\alpha)$ в индикаторном режиме при вращении сельсинов в различных направлениях (по и против часовой стрелки) отличаются друг от друга.

Электрическая асимметрия — неравенство сопротивлений фаз обмоток синхронизации — наиболее ощутима в контактных сельсинах с обмоткой синхронизации на роторе. В этом случае вследствие непостоянства переходных сопротивлений скользящих контактов активные сопротивления фаз обмотки синхронизации также непостоянны, что вызывает погрешность как в индикаторной, так и в трансформаторной синхронных передачах. В бесконтактных сельсинах скользящие контакты отсутствуют, поэтому электрическая асимметрия может возникать только за счет неравенства собственных сопротивлений обмоток. Сопротивления обмоток контролируются заводом-изготовителем, поэтому они примерно одинаковы. Небольшое отличие собственных сопротивлений фаз обмотки синхронизации не может вызвать большие погрешности в синхронной передаче.

Значительные погрешности в системах синхронной связи, как индикаторных, так и трансформаторных, вызывает магнитная асимметрия, возникающая, во-первых, за счет неравенства магнитных сопротивлений пакета стали статора (ротора) в различных радиальных направлениях, наличия короткозамкнутых контуров и т. п., во-вторых, за счет неравномерности воздушного зазора и, в-третьих, за счет зубчатого строения статора (ротора).

Магнитная асимметрия, возникающая за счет различных магнитных сопротивлений пакетов стали и неравномерности воздушного зазора в различных радиальных направлениях, приводит к погрешностям неопределенного характера, которые по-разному влияют на форму кривой погрешностей.

Магнитная асимметрия, возникающая из-за зубчатого строения статора (ротора), вызывает появление зубцовых гармоник (в кривой момента индикаторных сельсинов и в кривой ЭДС трансформаторных сельсинов). Погрешности от зубцовых гармоник обычно имеют периодичность, равную (или кратную) числу зубцов статора (ротора).

Для уменьшения зубцовых гармоник пазы статора или полюса ротора сельсинов скашивают на одно зубцовое деление. Однако это полностью не устраняет зубцовые гармоники, во-первых, из-за неточности скоса, что, как известно, имеет место на практике, во-вторых, из-за неравномерности воздушного зазора в аксиальном и различных радиальных направлениях и, в-третьих, из-за наличия торцовых потоков — потоков выпучивания.

Зубцовые гармоники в сельсинах с явновыраженными полюсами могут быть значительно уменьшены за счет правильного выбора полюсной дуги $b_п$. В индикаторных сельсинах полюсная дуга должна быть примерно равна (чуть меньше) целому числу N зубцовых делений t_Z: $b_п \approx N t_Z$. В трансформаторных сельсинах $b_п \approx (N + 0{,}5) t_Z$. Однако, несмотря на принятие всех перечисленных мер, зубцовые гармоники в сельсинах полностью устранить не удается; они, как правило, влияют на погрешность сельсинов.

Время успокоения сельсина-приемника и критический угол рассогласования сельсинов в индикаторном режиме зависят, во-первых, от соотношения активного и индуктивного сопротивлений обмоток синхронизации, во-вторых, от момента инерции ротора. Чем больше активное сопротивление, меньше индуктивное сопротивление и момент инерции ротора, тем меньше время успокоения сельсинов и больше критический угол рассогласования. Однако увеличение активного и уменьшение индуктивного сопротивлений, как правило, приводят к снижению удельного синхронизирующего момента сельсинов. Именно поэтому для уменьшения времени успокоения сельсины снабжаются обычно специальными демпферами — электромагнитными или механическими.

Кривая зависимости синхронизирующего момента от угла рассогласования $M = f(\alpha)$ сельсинов (см. рис. 9.21) близка к синусоиде. Если при выводе этой зависимости пренебречь разностью магнитных проводимостей по продольной и поперечной осям сельсина, а также влиянием токов обмотки синхронизации на поток сельсина и ток обмотки возбуждения, то $M = M_m \sin \alpha$.

В реальных сельсинах всегда токи обмотки синхронизации влияют на поток сельсина и ток обмотки возбуждения. Кроме того, у большинства индикаторных сельсинов магнитные сопротивления по продольной и поперечной осям не равны: $x_d \neq x_q$. Это приводит к тому, что кривая зависимости $M = f(\alpha)$ отклоняется от синусоиды.

Обычно у явнополюсных сельсинов максимум кривой смещается в сторону меньших углов ($\alpha_{макс}<90°$), а в неявнополюсных сельсинах — в сторону больших углов ($\alpha_{макс}>90°$).

В индикаторном режиме мощности и токи, потребляемые сельсинами из сети, возрастают с увеличением угла рассогласования α (см. рис. 9.21). Это объясняется тем, что с ростом α увеличиваются уравнительные токи в обмотках синхронизации, а следовательно, токи и мощности в обмотках возбуждения приемника и датчика, аналогично тому, как это имеет место в первичных обмотках трансформаторов с возрастанием нагрузки. Токи обмоток синхронизации в индикаторном и трансформаторном режимах изменяются при увеличении угла рассогласования по синусоидальному закону.

Выходное напряжение сельсина-приемника в трансформаторном режиме изменяется по синусоидальному закону от угла рассогласования (см. рис. 9.24). Это объясняется тем, что по синусоидальному закону изменяется потокосцепление выходной обмотки с потоком, создаваемым токами обмотки синхронизации сельсина-приемника. Выходное напряжение зависит от сопротивления нагрузки так же, как и вторичное напряжение любого трансформатора. Чем меньше сопротивление нагрузки, тем больше ток выходной обмотки и падения напряжений на внутренних сопротивлениях обмоток сельсинов и, следовательно, меньше выходное напряжение.

Выходная мощность сельсина-приемника в трансформаторном режиме зависит от сопротивления нагрузки: при $R=\infty$ она равна нулю; при уменьшении R до определенного значения она растет, а затем падает,. как у любого трансформатора.

Характер изменения мощности $P_{в.д}$ и тока $I_{в.д}$, потребляемых сельсином-датчиком из сети в трансформаторном режиме при изменении угла рассогласования α, зависит от значения и характера нагрузки на выходной обмотке приемника и конструкции сельсина-приемника — наличия или отсутствия явновыраженных полюсов. На рис. 9.26 и 9.27 представлены зависимости $P_{в.д}=f(\alpha)$ и $I_{в.д}=f(\alpha)$ бесконтактного сельсина-приемника БС-501, работающего от датчика БД-501 при различных нагрузках. Анализируя эти зависимости, нетрудно заметить, что мощности и токи, потребляемые датчиком в трансформаторном режиме, изменяются при возрастании угла рассогласования примерно по синусоидальному закону, причем при $\alpha=0$ и $\alpha=180°$ мощность $P_{в.д}$ и ток $I_{в.д}$ не зависят от характера нагрузки. Это объясняется тем, что выходное напряжение сельсина-приемника в этом случае равно нулю и ток в выходной обмотке отсутствует.

Разница в токах фаз (в проводах линии связи), имеющая место в сельсинах с явновыраженными полюсами (см. рис. 9.25), обусловлена тем, что одна из фаз (в этом случае фаза C) обмотки синхронизации сельсина-приемника направлена перпендикулярно оси полюсов ротора и вследствие этого имеет значительно меньшее индуктивное сопротивление, чем две другие фазы, направленные под углом 30° к оси полюсов. В сельсинах с неявновыраженными полюсами этого явления не наблюдается.

Вопросы для самопроверки

1. Что называется электрической системой синхронной связи?
2. Какие системы синхронной связи применяются на практике?
3. Укажите недостатки контактных сельсинов.
4. Назовите положительные и отрицательные качества бесконтактных сельсинов.
5. Через какие элементы (последовательно) проходит силовая линия основного магнитного поля в бесконтактном сельсине?
6. Каков принцип действия индикаторной системы синхронной связи?
7. Назовите факторы, определяющие точность работы сельсинов в индикаторной системе синхронной связи.
8. Объясните принцип действия сельсинов в трансформаторной системе синхронной связи.
9. Назовите факторы, определяющие точность работы трансформаторной системы синхронной связи.
10. На какие классы делятся индикаторные и трансформаторные сельсины по точности?
11. Что называется удельным синхронизирующим моментом? Удельным выходным напряжением? Как они определяются?
12. Как определяются время успокоения сельсинов и критический угол рассогласования?
13. Как определяется погрешность сельсинов в индикаторном и трансформаторном режимах?
14. Как влияет сопротивление линии связи на удельный синхронизирующий момент и удельное выходное напряжение?

§ 9.4. ПОВОРОТНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР

Поворотные (вращающиеся) трансформаторы (ПТ) представляют собой индукционные электрические машины малой мощности переменного тока. Они относятся к информационным электрическим машинам автоматических устройств. Поворотные трансформаторы используются как преобразователи механического перемещения угла поворота ротора α в электрический сигнал — выходное напряжение U, амплитуда которого находится в определенной функциональной зависимости от угла поворота ротора.

Сердечники статора и ротора ПТ (рис. 9.28) набираются из листов пермаллоя или электротехнической стали. В полузакрытые пазы этих сердечников укладываются две попарно одинаковые взаимно перпендикулярные обмотки. Обмотки статора называются *первичными*, обмотки ротора — *вторичными*. Одна из статорных обмоток называется *обмоткой возбуждения* и подключается к сети переменного тока. Другая статорная обмотка называется *квадратурной* (компенсационной). Одна из роторных обмоток называется *синусной*, другая — *косинусной*.

Выводы обмоток имеют обозначения: B_1, B_2 — обмотка возбуждения; B_3, B_4 — квадратурная обмотка; C_1, C_2 — синусная обмотка; K_1, K_2 — косинусная обмотка.

Статорные обмотки ПТ присоединяются к зажимам контактной платы; роторные обмотки — к той же контактной плате либо с помощью контактных колец и щеток — в ПТ с неограниченным углом поворота ротора, либо с помощью гибких проводников — в ПТ с ог-

раниченным углом поворота ротора, либо с помощью кольцевых трансформаторов — в бесконтактных ПТ.

Особенность ПТ состоит в том, что взаимная индуктивность между обмотками статора и ротора с высокой степенью точности изменяется по синусоидальному (косинусоидальному) закону от угла поворота ротора α.

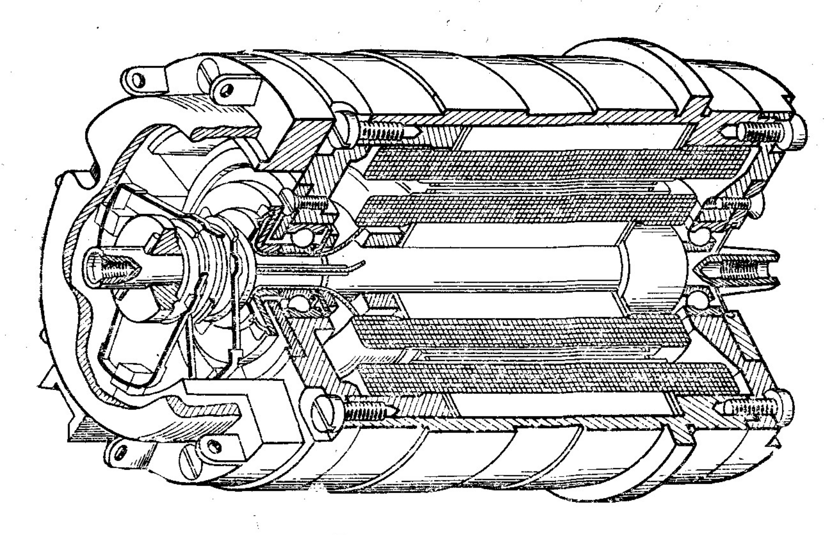


Рис. 9.28. Общий вид ПТ

В зависимости от схемы соединения обмоток с помощью ПТ можно производить следующие преобразования: синусно-косинусное — СКПТ, у которого выходное напряжение изменяется по закону $\sin\alpha$ и $\cos\alpha$; линейное — ЛПТ, у которого выходное напряжение изменяется прямо пропорционально углу поворота ротора; линейное изменение фазы выходного напряжения при неизменной его амплитуде — ПТ-фазовращатель; изменение системы координат — ПТ-построитель или ПТ-преобразователь координат; плавное изменение выходного напряжения от нуля до некоторого максимального значения — масштабный ПТ; дистанционную передачу угла α — ПТ в режиме трансформаторной дистанционной передачи.

Поворотные трансформаторы широко применяются в автоматических и вычислительных устройствах для решения алгебраических, геометрических, тригонометрических задач, а также задач, связанных с выполнением операций дифференцирования, интегрирования. Как элементы автоматических устройств ПТ характеризуются рядом величин, определяющих возможность их применения в той или иной схеме. К таким величинам относятся номинальное напряжение возбуждения, частота сети, коэффициент трансформации, входное и выходное сопротивления, угол сдвига фазы между вторичной ЭДС и напряжением возбуждения, погрешность.

Таблица 9.3

№ п/п	Режим работы	Параметры точности	Классы точности					
			0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0,3
1	СКТ	Погрешность отображения синусной зависимости, не более	±0,01	±0,02	±0,05	±0,1	±0,2	±0,3
2		Асимметрия нулевых точек, не более	±20″	±40″	±1′40″	±3′20″	±6′40″	±10′
3		ЭДС квадратурной обмотки, не более	0,08	0,12	0,30	0,60	1,20	1,80
4		Остаточная ЭДС в нулевых точках, не более	0,006	0,010	0,025	0,050	0,100	0,150

Продолжение табл. 9.3

№ п/п	Режим работы	Параметры точности	Классы точности					
			0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0,3
1	ЛПТ	Погрешность отображения линейной зависимости, не более	—	—	±0,05	±0,1	±0,2	±0,3
2		Остаточная ЭДС, %, не более	—	—	0,025	0,05	0,10	0,15
			1	2				
1	Фазовращатель	Фазовая погрешность, мин	±10 ±15	±30 ±60	Рабочая частота 0,4—40 кГц Рабочая частота 40—200 кГц			
2		Амплитудная погрешность, %, не более	±0,29 ±0,435	±0,87 ±1,74	Рабочая частота 0,4—40 кГц 40—200 кГц			

Наиболее важными для ПТ являются показатели, характеризующие точность:

1) относительная амплитудная погрешность воспроизведения синусоидальной зависимости вторичной ЭДС от угла поворота ротора, выражаемая в процентах (ε, %) или угловых минутах ($\Delta\alpha'$);

2) асимметрия нулевых точек, характеризующая неперпендикулярность обмоток статора и ротора ПТ в угловых минутах ($\Delta\alpha'_{ac}$);

3) остаточная ЭДС (%) в нулевых точках

$$e_{ост\%}=(E_{ост}/E_{2m})\,100\leqslant 0{,}5\varepsilon;$$

4) ЭДС квадратурной обмотки (%)

$$e_{кв\%}=(E_{кв}/U_{вm})\,100\leqslant(5\div 6)\,\varepsilon;$$

5) разность коэффициентов трансформации (%)

$$\Delta k_{m\%}=[(k_{m\,макс}-k_{m\,мин})/k_{m\,макс}]\,100\leqslant 1{,}5\varepsilon.$$

Точность ПТ в каждом режиме определяется по наихудшему из измеренных показателей точности. В зависимости от погрешности ПТ разделяются на шесть классов точности (табл. 9.3).

Для установки и измерения углов ПТ применяются высокоточные оптические делительные головки, теодолиты и специальные измерительные редукторы, позволяющие определять как основные, так и дополнительные погрешности. При холостом ходе ПТ выявляются погрешности, обусловленные конструктивными и технологическими причинами; при нагрузке — погрешности от действия потока реакции ротора. Для устранения погрешности от действия поперечного потока реакции ротора применяется симметрирование, которое может быть первичным — со стороны статора или вторичным — со стороны ротора.

Цель исследований ПТ — изучение основных выходных характеристик, осуществление симметрирования, ознакомление с работой ПТ в режимах преобразователя координат и построителя.

ПРОГРАММА РАБОТЫ

А. Экспериментальные исследования

1. Ознакомиться с паспортными данными ПТ и его конструкцией.
2. Определить максимальный коэффициент трансформации по напряжению k_m, входное сопротивление $Z_{вх\,0}$ ПТ при холостом ходе.
3. Определить асимметрию нулевых точек $\Delta\alpha'_{ac}$, остаточную ЭДС в нулевых точках $e_{ост}$ и ЭДС квадратурной обмотки $e_{кв}$.
4. Снять характеристики: а) синусно-косинусную; б) линейную; в) зависимость напряжения на вторичной обмотке U_C от напряжения на первичной обмотке $U_в$ при $\alpha=\text{const}$ и $Z_{н\,C}=\text{const}$.
5. Исследовать работу ПТ в режиме построителя.
6. Произвести симметрирование синусно-косинусного ПТ.

Б. Расчеты и построения

1. Начертить эскиз ПТ.

2. По установленному значению напряжения возбуждения $U_{в.н}$ и измеренным значениям максимальных ЭДС синусной и косинусной обмоток E_{Cm} и E_{Km} вычислить максимальный коэффициент трансформации k_m.

3. По установленному номинальному напряжению возбуждения $U_{в.н}$ и измеренному току $I_{в\,0}$ при холостом ходе вычислить входное сопротивление ПТ $Z_{вх\,0}$.

4. Рассчитать асимметрию нулевых точек $\Delta\alpha_{ас}$ в угловых минутах и максимальную остаточную ЭДС в нулевых точках $\varepsilon_{ост\,m}$ в процентах.

5. Рассчитать ЭДС квадратурной обмотки $e_{кв}$ (%) от напряжения возбуждения $U_{в.н}$.

6. Построить на одном графике зависимости выходных напряжений для синусной $U_C=f(\alpha)$ и косинусной $U_K=f(\alpha)$ обмоток.

7. Построить зависимость напряжения $U_C=f(\alpha)$ для линейного ПТ.

8. Построить на одном графике зависимость выходного напряжения от напряжения возбуждения $U_C=f(U_в)$ для двух значений угла α и двух значений сопротивления нагрузки $Z_{н\,С}$.

9. По заданным катетам определить расчетным путем гипотенузы и углы с помощью ПТ-построителя.

ПОЯСНЕНИЯ И УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

Перед началом испытаний следует ознакомиться с паспортными данными и конструкцией ПТ. Осмотреть токосъемное устройство, убедиться в его исправности. Ознакомиться с угломерным устройством (измерительным редуктором). Подобрать электроизмерительные приборы, необходимые для измерения электрических величин с заданной степенью точности.

Исследуемый ПТ закрепляется в измерительном редукторе, предназначенном для поворота ротора на определенные углы и их измерения. Редуктор имеет две шкалы: одну — отградуированную в градусах, а другую — отградуированную в долях градуса — минутах. Для удобства работы шкалы угломерного устройства (редуктора) могут поворачиваться вокруг своих осей и удерживаться в заданном положении за счет сил трения. Это позволяет устанавливать нулевое положение исследуемого ПТ, т. е. совмещать угловое положение ротора, при котором имеет место минимальное («нулевое») напряжение с нулевой отметкой на шкалах.

Определение максимального коэффициента трансформации ПТ и входного сопротивления при холостом ходе. Для определения максимального коэффициента трансформации при разомкнутой квадратурной обмотке на обмотку возбуждения B_1B_2 подается номинальное напряжение $U_{в.н}$ (рис. 9.29). Ротор ПТ поворачивается до положения, при котором ЭДС синусной обмотки ротора C_1C_2

станет равной нулю: $E_C=0$, а ЭДС косинусной обмотки K_1K_2 станет максимальной: E_{Km}. Коэффициент трансформации определяется как отношение соответствующих величин:

$$k_m = w_K/w_в = E_{Km}/U_{в.н},$$

где w_K, $w_в$ — эффективные числа витков обмоток.

Определение входного сопротивления ПТ при холостом ходе $Z_{вх\,0}$ производится по схеме, приведенной на рис. 9.29. По измеренным значениям $U_{в.н}$ и $I_{в\,0}$ вычисляется модуль входного сопротивления ПТ (Ом):

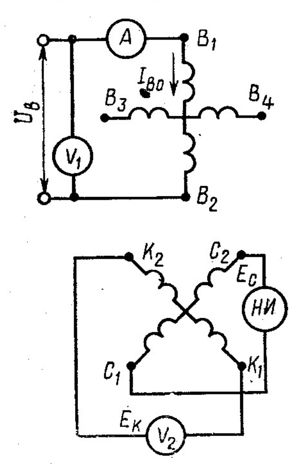


Рис. 9.29. Схема для определения коэффициента трансформации и входного сопротивления ПТ

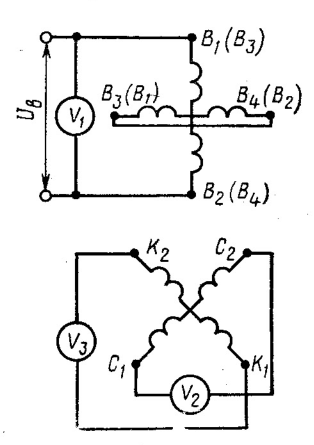


Рис. 9.30. Схема для определения асимметрии нулевых точек и остаточных ЭДС в нулевых точках СКПТ

$$Z_{вх0} = U_{в.н}/I_{в0}.$$

Точность определения $Z_{вх\,0}$ зависит от классов точности вольтметра и амперметра.

Определение асимметрии нулевых точек, остаточных ЭДС в нулевых точках и ЭДС квадратурной обмотки. Для проверки асимметрии нулевых точек и остаточных ЭДС в нулевых точках напряжение подается на обмотку возбуждения B_1B_2; квадратурная обобмотка B_3B_4 при этом замкнута накоротко (рис. 9.30). Ротор испытуемого ПТ поворачивают до угла, при котором ЭДС синусной обмотки C_1C_2 минимальна. Это угловое положение ротора α_1 принимают за нулевое. Шкалы угломерного устройства устанавливают в нулевое положение. Остаточная ЭДС отсчитывается по вольтметру V_2. После этого поворачивают ротор примерно на 180° и, добиваясь минимального показания вольтметра, фиксируют вторую нулевую точку: угол α_2 и остаточную ЭДС $E_{ост\,2}$. После этого поворачивают ротор до минимального показания вольтметра V_3 и фиксируют

третью точку измерений: α_3 и $E_{\text{ост}\,3}$. Затем поворачивают ротор примерно на угол ($\alpha_3+180°$) и, снова добиваясь минимального показания вольтметра, фиксируют четвертую точку: α_4 и $E_{\text{ост}\,4}$.

В указанном порядке подобная процедура повторяется при питании квадратурной обмотки B_3B_4 и замкнутой накоротко обмотки возбуждения B_1B_2. Таким образом получается восемь точек с данными измерений, в результате анализа которых выбираются наибольшие значения остаточной ЭДС и наибольшие отклонения измеренных углов со знаком «+» и «—». Асимметрия нулевых точек рассчитывается по формуле

$$\Delta\alpha^{\bullet}_{\text{ас}}=(\,|+\alpha_{im}|+|-\alpha_{im}|\,)/2.$$

Относительная остаточная ЭДС в нулевых точках определяется отношением

$$e_{\text{ост}\%}=(E_{\text{ост}\,m}/E_{Cm})\,100.$$

Для каждого класса точности относительная остаточная ЭДС в нулевых точках не должна превосходить значений, указанных в табл. 9.3.

Определение ЭДС квадратурной обмотки производится при питании обмотки возбуждения B_1B_2 номинальным напряжением. К квадратурной обмотке B_3B_4 подключается вольтметр и измеряется ЭДС при повороте ротора от 0 до $\pm360°$ через каждые 30°.

Относительная ЭДС квадратурной обмотки определяется по формуле

$$e_{\text{кв}\%}=(E_{\text{кв}\,m}/U_{\text{в.н}})\,100.$$

Здесь $E_{\text{кв}\,m}$ — максимальная ЭДС квадратурной обмотки; $U_{\text{в.н}}$ — номинальное напряжение обмотки возбуждения.

Синусно-косинусный ПТ. В СКПТ при холостом ходе ЭДС синусной обмотки C_1C_2 выражается зависимостью $E_{C\,0}=E_{\text{в}}k_m\sin\alpha$, а косинусной обмотки K_1K_2 — зависимостью $E_{K\,0}=E_{\text{в}}k_m\cos\alpha$. При нагрузке

$$\dot{E}_C=\dot{E}_{\text{в}}k_m\sin\alpha/(1+\dot{a}\cos^2\alpha); \qquad (9.11)$$

$$\dot{E}_K=\dot{E}_{\text{в}}k_m\cos\alpha/(1+\dot{b}\sin^2\alpha). \qquad (9.12)$$

Здесь $\dot{a}$ и $\dot{b}$ — комплексные коэффициенты, зависящие от параметров ПТ и частоты сети.

Выходные синусная и косинусная характеристики снимаются по схеме, приведенной на рис. 9.30. На обмотку возбуждения B_1B_2 подают номинальное напряжение. Ротор ПТ поворачивают до положения, при котором вольтметр, включенный на выводы синусной обмотки C_1C_2, показывает нуль. Это положение ротора принимают за начальное. На шкале угломерного устройства устанавливают нуль. При таком положении ротора ось синусной обмотки расположена перпендикулярно, а ось косинусной обмотки — параллельно оси обмотки возбуждения. После установки нулевого положения ротор

поворачивают на угол от 0 до 180°. При этом через каждые 10—15° измеряют напряжения на зажимах синусной U_C и косинусной U_K обмоток. Для повышения точности измерений рекомендуется измерять напряжения одним вольтметром.

По опытным данным строятся зависимости U_C и U_K от угла поворота ротора α (рис. 9.31).

Линейный ПТ (ЛПТ). Линейная характеристика снимается по схеме ЛПТ с вторичным симметрированием (рис. 9.32). Для полного устранения погрешности от влияния попе-

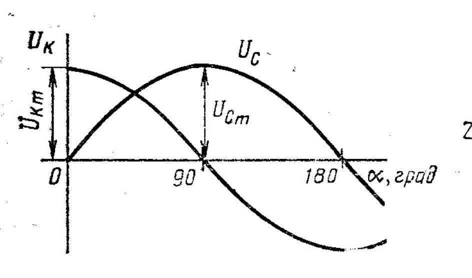


Рис. 9.31. Выходные характеристики СКПТ

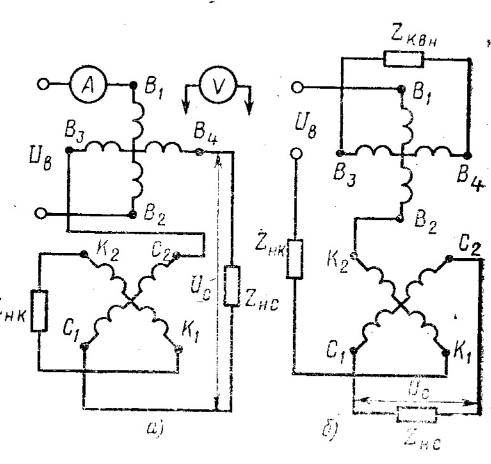


Рис. 9.32. Схемы линейных поворотных трансформаторов при вторичном (*а*) и первичном (*б*) симметрировании

речного поля необходимо выполнить условия вторичного симметрирования — добиться равенства полных сопротивлений цепей вторичных обмоток C_1C_2 и K_1K_2:

$$Z_{кв}+Z_C+Z_{нC}=Z_K+Z_{нK}.$$

Для проверки наличия симметрии в цепь обмотки возбуждения следует включить амперметр. Неизменность показаний амперметра при повороте ротора свидетельствует о достижении полной симметрии.

Характеристика снимается при постоянном номинальном напряжении на обмотке возбуждения $U_{в.н}=\text{const}$. За исходное, нулевое, положение ротора принимается такое, при котором напряжение в цепи последовательно соединенных синусной и квадратурной обмоток равно нулю. Поворачивая ротор от 0 до 180°, через каждые 10—15° измеряют напряжение на сопротивлении $Z_{нC}$. По опытным данным строится зависимость $U_C=f(\alpha)$ (рис. 9.33).

Выходная характеристика ЛПТ имеет вид

$$U_C=U_в k_m \sin\alpha/(1+m\cos\alpha). \qquad (9.13)$$

Здесь m — постоянный коэффициент, зависящий от электрических и магнитных параметров ЛПТ. При $m=0{,}54$ зависимость полу-

чается линейной с точностью до 0,1% в пределах изменения угла поворота ротора от —60 до +60°.

Масштабный ПТ (МПТ). Зависимость напряжения на вторичной обмотке C_1C_2 от напряжения на обмотке возбуждения при постоянных сопротивлениях нагрузки $Z_{\text{н}\,C}=\text{const}$, $Z_{\text{н}\,K}=\infty$ и угле поворота ротора $\alpha=\text{const}$ снимается по схеме, приведенной на рис. 9.34, при замкнутой квадратурной обмотке.

При номинальном напряжении на обмотке возбуждения за исходное нулевое положение ротора принимается такое, при котором на косинусной обмотке напряжение равно нулю. При этом выходное напряжение снимается с синусной обмотки.

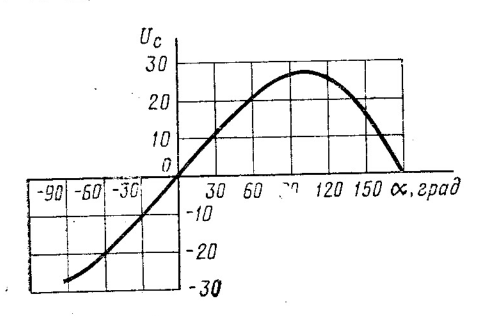


Рис. 9.33. Зависимость выходного напряжения ЛПТ от угла поворота ротора

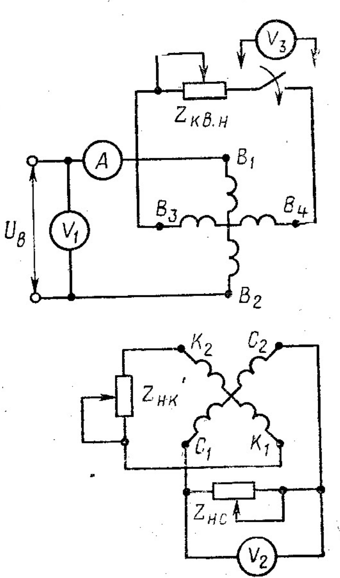


Рис. 9.34. Схема для проверки симметрирования ПТ

Опыт проводится для положений ротора $\alpha_1=45°$ и $\alpha_2=60°$ и значений сопротивления нагрузки $Z_{\text{н}\,C}=\infty$ и $Z_{\text{н}\,C}=500$ Ом при каждом значении угла α. После установки угла α и сопротивлений нагрузки с помощью автотрансформатора изменяют напряжение возбуждения в пределах $(0{,}3\div1{,}2)U_{\text{в.н}}$ и снимают зависимости $U_C=f(U_{\text{в}})$, показанные на рис. 9.35.

Исследование работы ПТ в режиме построителя. С помощью ПТ-построителя можно определить гипотенузу треугольника $c\equiv U_C$ и угол β по заданным катетам $b\equiv U_{\text{в}}$ и $a\equiv U_{\text{кв}}$ (рис. 9.36).

В исходном, нулевом, положении ось синусной обмотки располагается параллельно оси квадратурной обмотки, а ось косинусной обмотки — параллельно оси обмотки возбуждения. С помощью потенциометров от сети на обмотку возбуждения подается напряжение $U_{\text{в}}\equiv b$, а на квадратурную обмотку — одинаковое по фазе напряжение $U_{\text{кв}}\equiv a$. Токи в обмотках возбуждения и квадратурной создадут пульсирующие магнитные потоки, которые при отсутствии насыщения прямо пропорциональны заданным катетам: $\Phi_{\text{кв}}\equiv a$ и $\Phi_{\text{в}}\equiv b$. Результирующий поток Φ, сцепляясь с обмотками ротора, наводит

в них ЭДС. В несложной следящей системе (рис. 9.36), в которую кроме испытуемого ПТ-построителя входят исполнительный двигатель *ИД* с редуктором *Р* и усилитель *У*, ЭДС косинусной обмотки через усилитель воздействует на обмотку управления *ИД*. Ротор *ИД* приходит во вращение и поворачивает ротор ПТ до тех пор, пока косинусная обмотка не займет положение, перпендикулярное потоку Ф. В этом положении ЭДС косинусной обмотки $E_K=0$, а значение ЭДС синусной обмотки C_1C_2 максимально ($E_C=E_{Cm}$) и прямо пропорционально гипотенузе заданного треугольника *с*. Действительное значение U_C будет равно измеренной ЭДС E_{Cm}, умноженной на масштаб $m=1/k_m$.

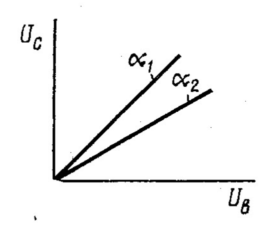


Рис. 9.35. Выходные характеристики масштабного ПТ

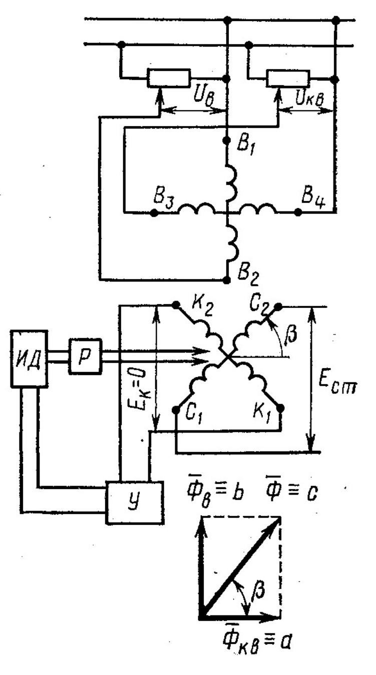


Рис. 9.36. Схема ПТ в режиме построителя

Вектор результирующего магнитного потока $\bar{\Phi}$, равный геометрической сумме потоков $\bar{\Phi}_{кв}$ и $\bar{\Phi}_в$, расположится относительно векторов $\bar{\Phi}_{кв}$ и $\bar{\Phi}_в$ под теми же углами, что и гипотенуза относительно катетов *a* и *b*. Ось потока $\bar{\Phi}$ составит искомый угол β с осью квадратурной обмотки:

$$\beta=\mathrm{arctg}\,(U_в/U_{кв}).$$

Опыт может быть проведен для любого прямоугольного треугольника.

Симметрирование синусно-косинусного ПТ. Для устранения погрешностей в выходных напряжениях от влияния поперечных полей роторных обмоток при протекании по ним токов нагрузки производится симметрирование ПТ. Поперечные поля компенсируются подбором соответствующих сопротивлений либо в цепи статорной

(квадратурной) обмотки — первичное симметрирование, либо в цепи роторных обмоток — вторичное симметрирование.

Для осуществления первичного симметрирования необходимо равенство полных сопротивлений в цепях обмоток возбуждения и квадратурной. Для этого в цепь квадратурной обмотки следует включить сопротивление $Z_{кв.н}$, которое в сумме с собственным сопротивлением обмотки $Z_{кв}$ было бы равно полному сопротивлению цепи обмотки возбуждения:

$$Z_{кв.н}+Z_{кв}=Z_{ист}+Z_{л}+Z_{в}, \tag{9.14}$$

где $Z_{ист}$, $Z_{л}$ — соответственно сопротивления источника питания и линии, соединяющей источник питания с обмоткой возбуждения.

Если ПТ питается от мощного источника, внутреннее сопротивление которого равно нулю, квадратурную обмотку следует замкнуть накоротко ($Z_{кв.н}=0$).

Для осуществления вторичного симметрирования необходимо равенство полных сопротивлений цепей синусной и косинусной обмоток:

$$Z_C+Z_{нC}=Z_K+Z_{нK}.$$

Обычно собственные сопротивления вторичных обмоток одинаковы ($Z_C=Z_K$) и для осуществления вторичного симметрирования достаточно выполнить условие $Z_{н\,C}=Z_{н\,K}$. На практике используют активные сопротивления.

Экспериментальная проверка симметрирования производится по схеме, приведенной на рис. 9.34. При этом используется свойство независимости тока обмотки возбуждения от угла поворота ротора при полной вторичной симметрии. Сопротивления синусной и косинусной обмоток подбирают такими, при которых поворот ротора не вызывает изменения показаний амперметра, включенного в цепь обмотки возбуждения.

Более точно вторичное симметрирование проверяется вольтметром, включенным в цепь квадратурной обмотки. При полной вторичной симметрии поперечные поля синусной и косинусной обмоток направлены встречно и взаимно компенсируются. Суммарный поперечный поток равен нулю и не наводит ЭДС в квадратурной обмотке: $U_{кв}=0$.

Вначале рекомендуется произвести вторичное симметрирование с помощью амперметра в цепи обмотки возбуждения. Затем осуществить проверку с помощью вольтметра, включенного в квадратурную обмотку.

Первичное симметрирование производится путем замыкания накоротко квадратурной обмотки (предполагается, что $Z_{ист}+Z_{л}=0$). При этом следует обратить внимание на то, что показания амперметра, включенного в цепь обмотки возбуждения, с поворотом ротора изменяются. Это свидетельствует о том, что при первичном симметрировании угловое положение ротора влияет на ток в цепи обмотки возбуждения.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Погрешности ПТ можно разделить на две основные группы: связанные с конструкцией и технологией изготовления; обусловленные принципом действия работы.

К первой группе относятся погрешности, вызванные обмоточными и зубцовыми гармониками, а также нелинейностью магнитной характеристики. Эти погрешности выявляются в режиме холостого хода и вызывают отклонение выходной характеристики от заданного функционального закона (синусного, косинусного, линейного). Для устранения погрешностей от обмоточных гармоник применяются обмотки высшей точности (синусные и др.). Для подавления зубцовых гармоник производится скос пазов статора и ротора. Гармоники, обусловленные нелинейностью магнитной характеристики, устраняются путем обеспечения работы магнитопровода при малом насыщении. Кроме того, применяется тщательная технология изготовления ПТ, обеспечивающая точность штамповки, правильную сборку сердечников, веерную шихтовку, отсутствие эксцентриситета между осью вала и наружной поверхностью ротора и равномерность воздушного зазора.

Вторая группа погрешностей проявляется при нагрузке ПТ и вызывается поперечными составляющими потоков реакции поля ротора. Эти погрешности устраняются симметрированием обмоток ПТ.

Сущность первичного симметрирования заключается в компенсации поперечных потоков за счет потока квадратурной обмотки. В этой обмотке результирующий поперечный поток Φ_q наводит ЭДС $E_{\text{кв}}$ и вызывает встречный поток $\Phi_{\text{кв}}$. В результате их взаимодействия поток Φ_q значительно ослабляется и погрешность уменьшается.

Полная компенсация поперечных потоков при вторичном симметрировании происходит при равновесии МДС синусной и косинусной обмоток по поперечной оси:

$$I_C w_C \cos\alpha = I_K w_K \sin\alpha.$$

В ЛПТ с первичным симметрированием симметрирующее сопротивление $Z_{\text{н}\,K}$ включается в цепь обмотки возбуждения и соединенной с ней последовательно косинусной обмотки. Квадратурная обмотка замыкается на сопротивление $Z_{\text{кв.н}}$. При этом сопротивления $Z_{\text{н}\,K}$ и $Z_{\text{кв.н}}$ должны быть выбраны такими, чтобы поперечный поток $\Phi_K \sin\alpha$ косинусной обмотки и поток $\Phi_{\text{кв}}$ квадратурной обмотки были взаимно скомпенсированы при любом угле поворота ротора α.

При непостоянстве входного сопротивления достоинством ЛПТ с первичной симметрией является независимость его выходного сопротивления от угла поворота ротора α. При постоянстве входного сопротивления ЛПТ с вторичной симметрией существенным недостатком, значительно ограничивающим область его применения, является непостоянство выходного сопротивления от угла поворота ротора.

Вопросы для самопроверки

1. Как устроен ПТ?
2. Какие функции выполняют ПТ?
3. Укажите требования, предъявляемые к ПТ.
4. Какими мерами в ПТ обеспечивается высокая точность воспроизведения функциональных зависимостей выходных напряжений от угла поворота ротора?
5. От чего зависит асимметрия нулевых точек ПТ и ЭДС в нулевых точках?
6. Что называется симметрированием ПТ — первичным, вторичным? Как они осуществляются и с какой целью?
7. Как можно преобразовать СКПТ в ЛПТ, СКПТ в ПТ-построитель?
8. Укажите достоинства и недостатки первичного и вторичного симметрирования.
9. Укажите погрешности, связанные с принципом действия ПТ.
10. Каким образом в ПТ устраняется влияние зубцовых гармоник?
11. Какими мерами в ПТ достигается магнитная и электрическая симметрия?

Раздел четвертый

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МИКРОМАШИН

Глава 10

ОПЫТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МИКРОМАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

§ 10.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ ПРИ ОДНОФАЗНОМ ПИТАНИИ

Для анализа работы и расчета выходных характеристик машины необходимо знать параметры, являющиеся коэффициентами в системе уравнений для токов: активное сопротивление обмотки статора r_S; сопротивление рассеяния обмотки статора x_S; сопротивление взаимной индуктивности x_m обмоток статора и ротора, приведенное к обмотке статора; активное сопротивление ротора r_R, приведенное к обмотке статора; сопротивление рассеяния ротора x_R, приведенное к обмотке статора.

Значения параметров зависят от размеров машины, обмоточных данных и свойств использованных материалов. Большое влияние оказывает число фаз обмотки, что обусловлено взаимными индуктивностями между ними, вызываемыми как главным полем машины, так и потоками рассеяния. Параметры, определяемые при однофазном питании, используются для анализа работы машины при включении в сеть одной или двух фаз, сдвинутых в пространстве на электрический угол 90°.

Существующие методы определения параметров асинхронных двигателей можно разделить на две группы: требующие разборки машины и не требующие ее.

При разборке машины появляются дополнительные возможности для определения параметров, связанные с использованием измерительных катушек или других датчиков, размещаемых в воздушном зазоре или в пазах машины. Однако разборка машины приводит к нарушению рабочих свойств машины и поэтому не всегда возможна. Кроме того, некоторые методы предусматривают проведение опытов при вынутом роторе, что искажает магнитное поле машины. Поэтому большое значение приобретают методы определения параметров без разборки машины.

Все характеристики асинхронной машины могут быть выражены таким образом, что индуктивные сопротивления рассеяния обмоток статора и ротора войдут в уравнения только в сумме друг с другом.

Поэтому, во-первых, методы без разборки машины не позволяют разделить эти сопротивления, во-вторых, разделять их нет необхо-

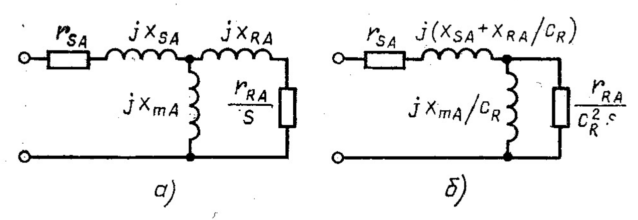


Рис. 10.1. Исходная (*а*) и преобразованная (*б*) схемы замещения асинхронной машины

димости. Это находит отражение при переносе намагничивающего контура в схемах замещения за индуктивное сопротивление ротора. Такое преобразование показано на рис. 10.1 на примере схемы замещения асинхронной машины при симметричных режимах работы. На рис. 10.2 приведена преобразованная схема замещения асинхронного двигателя при однофазном питании.

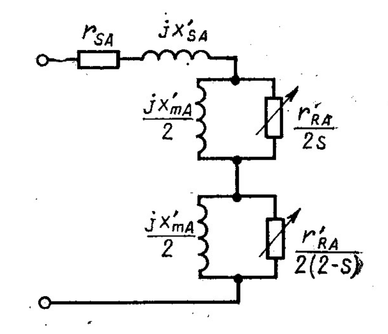


Рис. 10.2. Преобразованная схема замещения асинхронного двигателя при однофазном питании

Параметры преобразованной схемы замещения связаны с исходными следующими зависимостями:

$$x'_S = x_S + x_R/c_R; \quad (10.1)$$

$$x'_m = x_m/c_R; \quad (10.2)$$

$$r'_R = r_R/c_R^2; \quad (10.3)$$

$$c_R = 1 + x_R/x_m. \quad (10.4)$$

Полное сопротивление асинхронного двигателя при однофазном питании (без учета потерь в стали)

$$Z = r_S + jx'_S + \frac{jr'_R x'_m (r'_R + jx'_m)}{(r'_R)^2 - (x'_m)^2 (1 - \nu^2) + j2r'_R x'_m}. \quad (10.5)$$

Согласно теории геометрических мест, конец вектора $\overline{Z}$ при изменении относительной скорости $\nu = n/n_c$ перемещается по окружности. Круговые диаграммы полного сопротивления при однофазном питании приведены на рис. 10.3 для двигателей общего назначения, для которых характерно $x_m'/r_R' = 4 \div 20$, и на рис. 10.4 для исполнительных двигателей, имеющих обычно $x_m' \leqslant r_R'$.

При $\nu = \infty$ круговая диаграмма проходит через точку A с координатами

$$Z_\infty = r_S + jx'_S, \quad (10.6)$$

переменная составляющая вектора Z в этом случае равна нулю.

Диаметр $\overline{AB}$ круговой диаграммы можно определить из условия максимума модуля переменной составляющей $|Z - Z_\infty|$ вектора $\overline{Z}$ [см. (10.5)]. Очевидно, что максимум будет получен, когда действительная часть знаменателя переменной составляющей равна нулю:

$$(r'_R)^2 - (x'_m)^2 (1 - \nu^2) = 0. \tag{10.7}$$

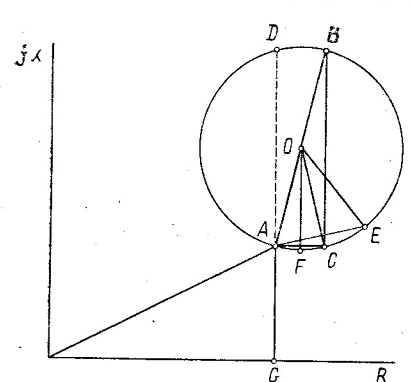


Рис. 10.3. Круговая диаграмма полного сопротивления асинхронного двигателя общего назначения КД 2,5-4 при однофазном питании

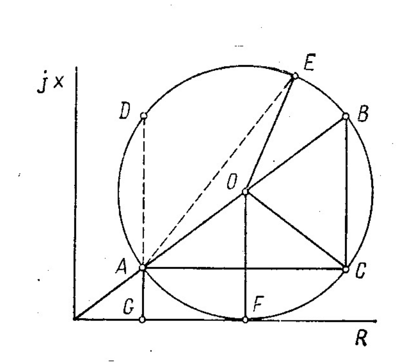


Рис. 10.4. Круговая диаграмма полного сопротивления асинхронного исполнительного двигателя АДП262 при однофазном питании

Таким образом,

$$\overline{AB} = (r'_R + jx'_m)/2 \tag{10.8}$$

и, следовательно,

$$\operatorname{tg} \angle BAC = x'_m / r'_R. \tag{10.9}$$

При коротком замыкании ($\nu = 0$) переменная составляющая вектора $\overline{Z}$

$$\overline{AE} = \frac{jr'_R x'_m}{r'_R + jx'_m} \tag{10.10}$$

и, следовательно,

$$\operatorname{tg} \angle DAE = x'_m / r'_R. \tag{10.11}$$

Из (10.9) и (10.11) следует, что $\angle DAE = \angle BAC$; $\angle DAB = \angle CAE$; $\smile DB = \smile CE = \smile AC$; $\angle AOC = \angle COE$. Проведем линию OF параллельно мнимой оси, тогда

$$\angle FOC = \frac{1}{2} \angle AOC = \frac{1}{3} \angle FOE.$$

Рассмотренные свойства круговой диаграммы позволяют использовать ее для опытного определения параметров без разборки машины. Можно рекомендовать такую последовательность операций:

1) измерить полное сопротивление машины при однофазном питании в режиме короткого замыкания и нескольких (не менее двух) значениях частоты вращения (измерять частоту вращения не нужно);

2) построить по полученным данным круговую диаграмму сопротивлений Z, отметить точку E, соответствующую режиму короткого замыкания;

3) провести линию OF параллельно мнимой оси;

4) разделить на три равные части $\angle FOE$, определить точку C;

5) провести линию AC параллельно действительной оси и линии CB и AG параллельно мнимой оси. При этом $\overline{AC}=r_R'/2$; $\overline{BC}=x_m'/2$; $\overline{AG}=x_S'$.

Метод дает хорошие результаты, если сопротивления x_m' и r_R' различаются не более чем в 8—10 раз.

Цель исследования — ознакомление с методикой опытного определения параметров схемы замещения. Объектом испытания могут быть асинхронные двигатели с двухфазной обмоткой на статоре, как исполнительные, так и неуправляемые. В табл. 10.1 приведены параметры схемы замещения в размерных и относительных единицах для некоторых управляемых и неуправляемых двигателей, отличающихся мощностью, числом полюсов и частотой вращения. Эти данные могут быть использованы как исходные для моделирования на расчетном столе.

Таблица 10.1

Тип двигателя	Обозначение двигателя	r_S	x_S'	x_m'	r_R'	ρ_S'	ξ_S'	ξ_m'	$P_н$, Вт	p	f, Гц
		Ом									
Исполнительные двигатели с ротором «беличья клетка»	ДМ 0,04	90	55	70	45	1,98	1,22	1,54	0,04	2	400
	ДМ 0,1	150	188	225	126	1,20	1,53	1,79	0,1	2	400
	ДМ 2,5	5,0	36	100	44	0,11	0,81	2,28	2,5	3	400
	ДКИ-1-12ТВ	66	96	198	149	0,44	0,65	1,33	1,0	2	400
	АД50	4,5	29	54	69	0,06	0,56	0,78	3,5	4	400
Исполнительные двигатели с полым ротором	АДП262	44	28	225	392	0,12	0,07	0,57	9,5	1	50
	АДП362	27,5	19	213	236	0,12	0,07	0,90	19,0	1	50
	АДП263А	34,6	164	342	483	0,07	0,08	0,71	27,8	3	500
	ЭМ-2М	80,6	70	168	296	0,27	0,24	0,57	2,9	3	500
	ДИД-0,1 ТА	361	73	260	346	1,05	0,21	0,75	0,1	1	400
Неуправляемые двигатели	КД-30	96,7	87	1450	94,5	1,02	0,92	14,8	60,0	1	50
	КД6-4	670	392	2130	470	1,43	0,83	4,53	6,0	2	50

ПРОГРАММА ИССЛЕДОВАНИЙ

А. Экспериментальные исследования

1. Ознакомиться с паспортными данными исследуемого двигателя, со значениями параметров двигателей-аналогов.
2. Ознакомиться со схемой испытательной установки и методами измерений на ней.
3. Измерить активные сопротивления обмоток статора исследуемого двигателя в холодном состоянии.
4. Определить полное сопротивление фазы двигателя при коротком замыкании.
5. Определить полное сопротивление фазы двигателя при однофазном питании для нескольких частот вращения (4—5 значений).

Б. Расчеты и построения

На основании результатов экспериментального исследования:

1. Построить круговую диаграмму сопротивления фазы двигателя при однофазном питании.
2. Определить параметры преобразованной схемы замещения.
3. Сравнить полученные значения параметров с параметрами двигателей-аналогов.

ПОЯСНЕНИЯ И УКАЗАНИЯ

Перед началом испытаний следует ознакомиться с номинальными данными двигателя, параметрами схемы замещения аналогичных двигателей, близких по мощности и частоте вращения. Это поможет представить себе соотношения параметров, уяснить, на что в первую очередь надо обратить внимание при проведении испытаний.

Все испытания проводятся на стенде, принципиальная схема которого приведена на рис. 10.5. Стенд имеет три основные части, каждая из которых выполняет свои функции: исследуемый двигатель; приводной двигатель со схемой управления, обеспечивающей регулирование частоты вращения до двойной синхронной скорости исследуемого двигателя; блок питания и измерения сопротивления исследуемого двигателя.

Сопротивления должны измеряться с высокой точностью. При использовании для этой цели амперметра, вольтметра и ваттметра необходимо учитывать собственное потребление приборов. Класс точности приборов должен быть не ниже 0,2. Наилучшие результаты дает измерение сопротивлений компенсационным методом, например с помощью потенциометров переменного тока. Чтобы исключить случайные погрешности, измерения каждой величины целесообразно повторить 3—4 раза. При проведении опытов следует поддерживать постоянными температуру обмоток и насыщение магнитной системы, для того чтобы параметры в процессе эксперимента оставались постоянными.

У неуправляемых двигателей $x_m' \gg r_R'$, поэтому особенно важно следить за постоянством насыщения, так как диаметр круговой диаграммы определяется в основном параметром x_m'. Контролировать температуру обмоток особенно важно при измерении сопротивления короткого замыкания, так как именно эти измерения определяют основные построения. Чтобы исключить влияние изменения сопротивления обмотки статора r_S при переменной температуре, целесообразно строить круговую диаграмму сопротивления $Z - r_S$ (а не сопротивления Z), измеряя величину r_S после каждого опыта.

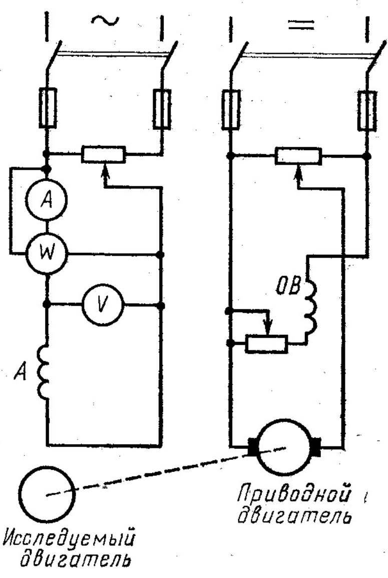


Рис. 10.5. Схема стенда для опытного определения параметров

У ИД магнитная система мало насыщена, а параметры x_m' и r_R' одного порядка. Поэтому здесь необходимо в первую очередь поддерживать постоянную температуру обмоток, контролируя ее после каждого опыта по значению сопротивления r_S, измеряемого мостом постоянного тока. Можно стабилизировать в достаточной степени температуру обмоток и насыщение магнитной системы, если проводить опыты при пониженном напряжении.

По данным опытов строится круговая диаграмма сопротивлений. Для ее построения достаточно трех точек в координатах r, x, но для повышения точности желательно иметь пять-шесть точек. При этом можно рекомендовать следующий прием построения. Находим все возможные центры окружностей для точки короткого замыкания и двух других точек, каждый раз выбираемых в новых сочетаниях. За счет погрешностей эксперимента эти центры могут не совпадать. В этом случае за центр окружности принимаем точку с координатами, определяемыми как среднее арифметическое координат, полученных при построении центров окружностей. Радиус окружности выбираем таким образом, чтобы окружность проходила через точку короткого замыкания *.

Дальнейшие построения проводятся в соответствии с рис. 10.3 или 10.4. Точку короткого замыкания E соединяем с центром окружности и проводим параллельно оси X радиус OF. Получившийся угол FOE делим на три равные части ($\angle FOC = {}^1/_3 \angle FOE$). Точка E короткого замыкания может лежать на верхней части окружности (для ИД), в этом случае угол FOE будет тупым. Проведем AC па-

* Можно построить окружности для всех найденных центров, определить параметры для каждой из окружностей и найти их среднее арифметическое.

раллельно оси R, AG и BC параллельно оси X. Получаем в масштабе сопротивлений:

$$\overline{AG}=x'_S;\ \overline{AC}=r'_R/2;\ \overline{BC}=x'_m/2.$$

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Полученные из круговой диаграммы опытные значения параметров схемы замещения необходимо сравнить с расчетными для машин, аналогичных по назначению и близких по мощности и частоте вращения. Это позволит установить характерные соотношения параметров для данного класса машин.

Для обобщения результатов исследования машин различных мощностей, частот вращения удобно использовать относительные параметры схемы замещения. В табл. 10.2 приведен диапазон относительных параметров асинхронных двигателей различного назначения: управляемых и неуправляемых. В качестве базовой величины здесь принято активное сопротивление ротора r_R' преобразованной схемы замещения.

Таблица 10.2

Относительные параметры	Неуправляемые двигатели ($P_н=1\div750$ Вт, $f=50$ Гц)	Управляемые двигатели: с полым немагнитным ротором ($P_н=0{,}1\div40$ Вт, $f=400$ и $f=500$ Гц)	Управляемые двигатели: с ротором типа «беличья клетка» ($P_н=0{,}04\div3{,}5$ Вт, $f=400$ Гц)
$\xi'_m=x'_m/r'_R$	5—45 при $2p=2$ 2—20 при $2p=4$	0,18—1,40(2,50)	0,7—2,3
$\rho'_S=r_S/r'_R$	0,6—2,5	0,06—0,35(1)	0,06—2,0
$\xi'_S=x'_S/r'_R$	0,6—3	0,14—0,40	0,4—1,5

Роль относительных параметров в электромеханическом преобразовании энергии различна. Относительное сопротивление взаимной индуктивности ξ_m' характеризует основные электромагнитные процессы, непосредственно связанные с передачей энергии электромагнитного поля через воздушный зазор к ротору и преобразованием ее в механическую. Относительные активное сопротивление обмотки статора ρ_S' и сопротивление рассеяния ξ_S' являются, в сущности, паразитными и непосредственного участия в преобразовании энергии не принимают, хотя и существенно влияют на протекающие процессы. Именно относительные параметры определяют основные выходные показатели машины, поэтому они оказываются весьма полезными в оценке оптимальности и в сравнении различных ее исполнений.

Вопросы для самопроверки

1. Какие методы опытного определения параметров асинхронных машин используются на практике? Каковы их достоинства и недостатки?
2. Почему при определении параметров без разборки машины невозможно разделить сопротивления рассеяния статора и ротора?
3. В чем главная идея опытного определения параметров схемы замещения методом круговой диаграммы сопротивлений при однофазном питании?
4. Какие опыты надо провести для построения круговой диаграммы сопротивлений?
5. Как обеспечить точность измерения активной и индуктивной составляющих сопротивлений?
6. Назовите последовательность построения круговой диаграммы сопротивлений фазы и определения отдельных параметров схемы замещения.
7. Каковы условия проведения опытов для определения параметров схемы замещения с достаточной точностью?
8. Как влияет температура обмоток на параметры схемы замещения?
9. Как влияет насыщение магнитной цепи машины на параметры схемы замещения?
10. Каковы характерные соотношения параметров схемы замещения для неуправляемых асинхронных двигателей?
11. Каковы характерные соотношения параметров схемы замещения для ИД с полым немагнитным ротором и ротором типа «беличья клетка»?
12. Какова роль параметров с точки зрения преобразования энергии в машине?

§ 10.2. ОПЫТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Для оценки точности методов расчета и экспериментальной доводки отдельных образцов синхронных двигателей необходимо знать их параметры. В синхронных двигателях с постоянными магнитами (СДПМ) и в синхронных реактивных двигателях (СРД) наибольшую трудность представляет опытное определение синхронных индуктивных сопротивлений по продольной и поперечной осям ротора (x_d и x_q). Нахождение других параметров синхронных двигателей может быть проведено известными методами, используемыми при испытании асинхронных машин.

При исследовании крупных синхронных машин с электромагнитным возбуждением для опытного определения параметров x_d и x_q используется, как известно, опыт малого скольжения [5]. Применение этого метода для двигателей малой мощности приводит к значительным погрешностям вследствие большого активного сопротивления обмоток статора. Для двигателей с постоянными магнитами этот способ не может быть использован, так как у них принципиально не удается устранить возбуждение со стороны ротора. Все это приводит к необходимости определять параметры синхронных микродвигателей непосредственно из рабочего режима. При этом исключается влияние короткозамкнутых пусковых обмоток ротора и учитывается насыщение магнитной цепи.

В основу опытного определения параметров синхронных двигателей при симметричном питании положены векторные диаграммы токов и напряжений (рис. 10.6). Согласно методу приближенной суперпозиции [13], эти векторные диаграммы справедливы и

для насыщенных машин. В отличие от асинхронных машин, где режим работы однозначно определяется скольжением, в синхронных двигателях в качестве переменной, характеризующей нагрузку, могут быть приняты углы θ_e, θ, θ_U, ψ, β. Наиболее широко в качестве угла нагрузки используется угол θ_U между поперечной осью ротора и вектором напряжения питания. Угол нагрузки принимается положительным, когда вектор напряжения опережает ось q.

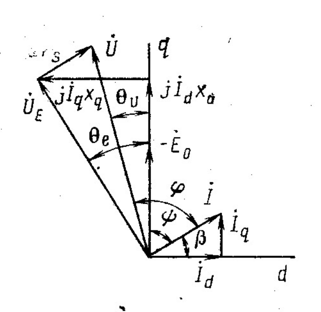


Рис. 10.6. Векторная диаграмма синхронного двигателя с системой возбуждения на роторе

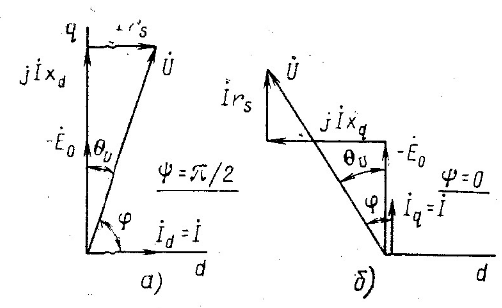


Рис. 10.7. Векторные диаграммы синхронного двигателя с постоянными магнитами для частных режимов

Из векторной диаграммы СДПМ (рис. 10.6) можно получить выражения для расчета синхронных индуктивных сопротивлений [7]:

$$x_d = \frac{U \cos \theta_U - Ir_S \cos(\varphi - \theta_U) - E_0}{I \sin(\varphi - \theta_U)} ; \qquad (10.12)$$

$$x_q = \frac{U \sin \theta_U + Ir_S \sin(\varphi - \theta_U)}{I \cos(\varphi - \theta_U)} . \qquad (10.13)$$

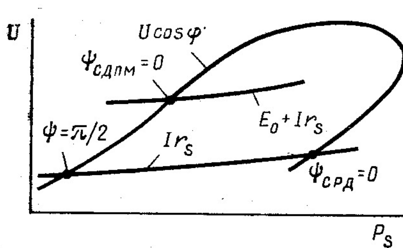


Рис. 10.8. График для определения частных режимов работы синхронных двигателей

Здесь U, I, E_0 — фазные значения напряжения, тока, ЭДС холостого хода; r_S — активное сопротивление фазы обмотки якоря.

В выражения (10.12), (10.13) входит угол нагрузки θ_U, измерение которого представляет известные трудности. Если с помощью приводного двигателя установить частные режимы работы исследуемого двигателя, то необходимость в определении угла θ_U отпадает. Так, в режиме идеального холостого хода (рис. 10.7, *а*), когда угол $\psi=\pi/2$, токи $I_q=0$, $I_d=I$, угол $\theta_U=(\varphi-\pi/2)<0$, индуктивное сопротивление по продольной оси рассчитывается как

$$x_d = (U \sin \varphi - E_0)/I. \qquad (10.14)$$

Этот режим характеризуется равенством $U \cos \varphi = Ir_S$.

В режиме, когда продольная составляющая тока отсутствует (рис. 10.7, *б*), ток $I_q = I$, углы нагрузки принимают значения $\psi = 0$, $\theta_U = \varphi$ и индуктивное сопротивление по поперечной оси определяется по формуле

$$x_q = U \sin \varphi / I. \tag{10.15}$$

Этот режим характеризуется равенством $U \cos \varphi = E_0 + I r_S$. Получить режимы, соответствующие уравнениям (10.14) и (10.15), достаточно сложно, поэтому их находят искусственно, используя графоаналитический способ — по пересеченной кривой $U \cos \varphi = f(P_S)$ с кривыми $I r_S = f(P_S)$ и $(E_0 + I r_S) = f(P_S)$ при изменении угла нагрузки от $-\pi/2$ до $\pi/2$ (рис. 10.8). Описание установки, позволяющей изменять угол нагрузки в широких пределах, приводится ниже.

При отсутствии возбуждения со стороны ротора ($E_0 = 0$) выражения (10.12)—(10.15) позволяют найти значения индуктивных сопротивлений СРД. Выражения (10.14), (10.15) позволяют исследовать влияние насыщения магнитопровода (напряжения питания) на параметры x_d и x_q синхронных двигателей. Для СДПМ, если использовать вспомогательный возбужденный микродвигатель, можно получить информацию об угле нагрузки и по выражениям (10.12), (10.13) проследить изменение параметров x_d и x_q в зависимости от режима работы.

Цель работы — ознакомить с методами опытного определения параметров СДПМ и СРД при симметричном трехфазном питании и дать представление о соотношениях индуктивных сопротивлений в синхронных микродвигателях.

ПРОГРАММА РАБОТЫ

А. Экспериментальные исследования

1. Ознакомиться с экспериментальной установкой, конструкцией и паспортными данными исследуемых двигателей.
2. Измерить активное сопротивление фазы обмотки статора испытуемых двигателей и ЭДС холостого хода СДПМ.
3. Определить синхронные индуктивные сопротивления x_d и x_q возбужденного двигателя: а) при различных напряжениях питания; б) для различных режимов работы при $U = U_н$.
4. Найти синхронные индуктивные сопротивления x_d и x_q реактивного двигателя при различных напряжениях питания.

Б. Расчеты и построения

1. Рассчитать и построить зависимости синхронных индуктивных сопротивлений от напряжения питания и угла нагрузки (для СДПМ).
2. Построить векторные диаграммы СДПМ и СРД для режима идеального холостого хода при $U = U_н$.

ПОЯСНЕНИЯ И УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

Схема установки для опытного определения синхронных индуктивных сопротивлений по осям *d*, *q* представлена на рис. 10.9. С валом исследуемого двигателя *ИД* сочленяется приводной двигатель *ПД*, мощность которого в 3—5 раз превышает мощность *ИД*.

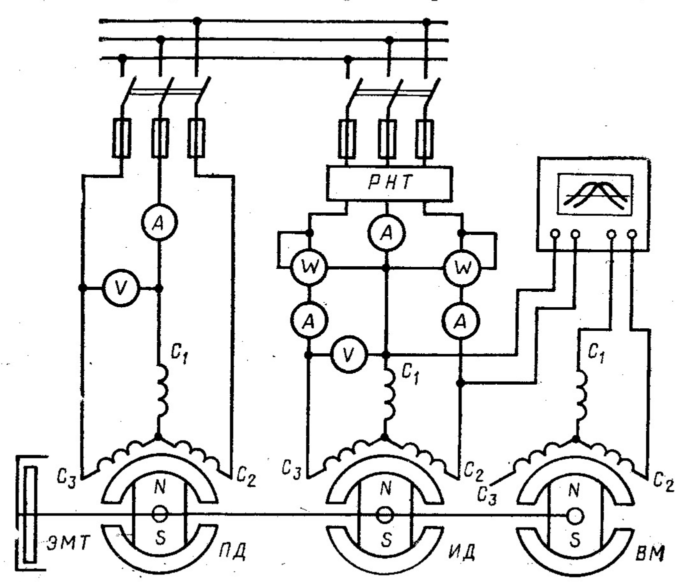


Рис. 10.9. Схема для опытного определения параметров синхронных микродвигателей

В качестве *ПД* применяется синхронный двигатель, имеющий то же число полюсов, что и *ИД*. Чередование фаз источников питания должно обеспечивать согласное вращение *ПД* и *ИД*. Для обеспечения устойчивой работы исследуемых двигателей в широком диапазоне изменения углов нагрузки приводной двигатель необходимо нагрузить с помощью электромагнитного тормоза *ЭМТ* моментом, превышающим максимальный синхронизирующий момент *ИД* ($M_{\text{п.д}} > M_{\text{вых и.д}}$). Статор *ИД* должен иметь возможность углового перемещения в пространстве на угол π/p с последующей фиксацией в любом заданном положении. Питание *ИД* осуществляется через трансформатор типа РНТ.

При использовании в качестве *ИД* двигателя с возбуждением на роторе появляется возможность измерения углов нагрузки θ_U. Для этого с валом *ИД* жестко сочленяется вспомогательная возбужденная синхронная машина *ВМ*, имеющая такое же число полюсов, что и *ИД*. Концы одноименных фаз обмоток статора и *ИД* и *ВМ* подаются на вход двухлучевого осциллографа. Подключив *ПД* к сети, поворотом статора *ИД* (либо статора *ВМ*) добиваются совмещения по фазе ЭДС холостого хода $E_{0\text{и.д}}$ и $E_{0\text{в.м}}$. Таким обра-

зом осуществляется одинаковое расположение роторов *ИД* и *ВМ* по отношению к одноименным фазам статорных обмоток. Осциллографируя в процессе исследований напряжение питания $U_{и.д}$ и электродвижущую силу — $E_{ов.м}$, измеряют угол нагрузки θ_U. Для измерения угла нагрузки можно также использовать фазометр. Описанную установку можно применить и для снятия угловых характеристик СДПМ.

Определение активного сопротивления фазы обмотки статора. Оно измеряется в соответствии с указаниями, изложенными в § 1.3. Особое внимание следует обратить на температурный режим работы двигателя. Рекомендуется в процессе исследований произвести несколько замеров активного сопротивления.

Для измерения ЭДС холостого хода $E_{0и.д}$ возбужденный двигатель приводится во вращение с помощью *ПД*. Напомним, что в выражения (10.12)—(10.15) входят фазные значения электрических величин.

Определение синхронных индуктивных сопротивлений. Для исследования влияния насыщения магнитопровода на параметры x_d и x_q снимаются зависимости I и $\cos\varphi$ от потребляемой мощности P_S при различных напряжениях питания ИД ($0{,}5U_н<U<1{,}2U_н$). Выбор в качестве аргумента потребляемой мощности позволяет более точно определить режимы, при которых $\psi=0$ и $\psi=\pi/2$. Объясняется это тем, что в двигателях малой мощности при изменении нагрузки от нуля до максимальной потребляемый ток изменяется в 2—3 раза, а потребляемая мощность — в 5—10 раз. Испытание рекомендуется начинать с режима, при котором потребляемая мощность минимальна. Этот режим устанавливается по показаниям ваттметров поворотом статора *ИД*. Затем статор *ИД* поворачивают в ту сторону, в направлении которой потребляемая мощность возрастает. Результаты измерений используют для расчета следующих величин:

$$P_S=P_\alpha \pm P_\beta;\ \cos\varphi=P_S/(\sqrt{3}U_л I);\ U\cos\varphi=P_S/(3I).$$

Построив на одном графике зависимости $U\cos\varphi$, Ir_S и (E_0+Ir_S) от P_S (рис. 10.8), находят режимы *ИД*, для которых $\psi=0$ и $\psi=\pi/2$. Для этих режимов определяются потребляемый ток и коэффициент мощности и по формулам (10.14), (10.15) рассчитываются индуктивные сопротивления x_d и x_q. Приведенный метод определения параметров x_d и x_q применим как для СДПМ, так и для СРД. Однако СРД в режиме, когда $\psi=0$, находится в неустойчивой зоне углов нагрузки. Устойчивость системы обеспечивается нагруженным приводным двигателем. По результатам расчетов строятся зависимости параметров x_d, x_q от напряжения питания и векторная диаграмма *ИД* для режима идеального холостого хода при $U=U_н$ (см. рис. 10.7, *а*).

При исследовании влияния нагрузки на параметры x_d, x_q СДПМ измеряются угол нагрузки, потребляемые мощности и ток и контролируется напряжение питания ($U=U_н$). Параметры x_d, x_q рассчитываются по формулам (10.12), (10.13).

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

При обработке результатов исследований следует обратить внимание на то, что в СДПМ в отличие от СРД и двигателей с электромагнитным возбуждением индуктивное сопротивление по поперечной оси превышает индуктивное сопротивление по продольной оси ($x_q > x_d$). Объясняется это тем, что в двигателях с радиальным расположением постоянных магнитов и короткозамкнутой обмотки бо́льшая часть продольного потока якоря замыкается по путям рассеяния полюсных башмаков из-за малой магнитной проницаемости материала магнитов (см. § 6.1). Магнитное сопротивление рассеяния полюсных наконечников определяется в основном шириной межполюсной прорези и значительно превышает магнитное сопротивление воздушного зазора. В то же время основная часть поперечного потока якоря замыкается лишь через воздушный зазор (рис. 10.10).

С возрастанием напряжения питания синхронные индуктивные сопротивления уменьшаются вследствие увеличения насыщения магнитной цепи. В СДПМ в процентном отношении наиболее быстро уменьшается параметр x_q, а в СРД — параметр x_d.

При изменении нагрузки синхронных двигателей (изменении угла θ_U) индуктивные сопротивления также не остаются постоянными вследствие перераспределения магнитных потоков по продольной и поперечной осям. Степень и характер изменения параметров x_d и x_q зависят от конструкции магнитной системы двигателя, степени его возбужденности и активного сопротивления обмотки якоря. Если синхронные двигатели выполнены на базе статора асинхронного двигателя, то параметр x_q в СДПМ и параметр x_d в СРД близки к значению полного индуктивного сопротивления обмотки статора ($x_m + x_{\sigma s}$) асинхронной машины. В СДПМ отношение индуктивных сопротивлений по осям d, q составляет $x_d/x_q = 0{,}3 \div 1{,}0$; в СРД — $x_d/x_q = 2 \div 5$. Практически равенство индуктивных сопротивлений по осям d и q имеет место в СДПМ с аксиальным расположением короткозамкнутой обмотки ротора и постоянных магнитов.

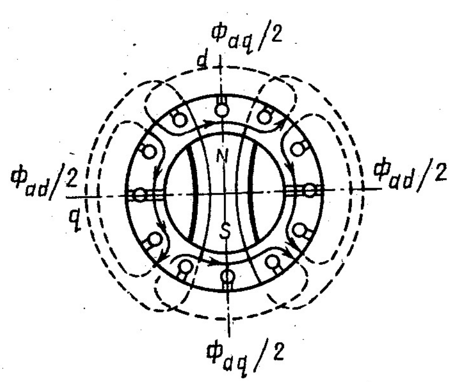


Рис. 10.10. Пути замыкания потоков якоря в синхронном двигателе с постоянными магнитами

Вопросы для самопроверки

1. Почему опыт малого скольжения неприменим для определения параметров двигателей с возбуждением от постоянных магнитов?
2. Что положено в основу опытного определения параметров x_d и x_q?

3. Что понимается под углом нагрузки?
4. Из каких режимов работы СРД определяются параметры x_d и x_q?
5. Чем отличаются векторные диаграммы СДПМ и СРД?
6. Каково назначение приводного двигателя?
7. Чем обеспечивается устойчивая работа опытной установки в широком диапазоне изменений угла нагрузки?
8. Каково назначение вспомогательной машины?
9. Какие электрические машины могут быть использованы в качестве приводного двигателя и вспомогательной машины?
10. Как может быть измерен угол нагрузки СДПМ?
11. Объясните различные соотношения параметров x_d и x_q в СДПМ и СРД.
12. Как изменяются параметры x_d и x_q при изменении напряжения питания?
13. Объясните непостоянство параметров x_d и x_q при изменении нагрузки двигателя.
14. Какое направление вращения должны иметь приводной и исследуемый двигатели?
15. Как определить положение поперечной оси СДПМ?

§10.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ПОСТОЯННОЙ ВРЕМЕНИ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МИКРОДВИГАТЕЛЕЙ

Одно из основных требований, предъявляемых к ИД как элементам системы автоматического регулирования и управления,— быстродействие при отработке сигнала — обеспечивается малой электромеханической постоянной времени $T_м$. Электромеханическая постоянная времени характеризует время разбега двигателя от момента подачи сигнала до определенной частоты вращения [10].

На практике чаще всего рассматривается пуск двигателя без статического момента сопротивления на валу (в режиме холостого хода) под действием момента, развиваемого двигателем в процессе разбега. В этом случае дифференциальное уравнение моментов ИД при разбеге имеет вид

$$M = J d\Omega/dt, \qquad (10.16)$$

где M — вращающий момент двигателя; J — момент инерции ротора; Ω — угловая скорость.

Если реальную механическую характеристику ИД переменного тока линеаризировать, соединив точки пускового момента $M_к$ и угловую скорость холостого хода $\Omega_х$ (рис. 10.11), то можно получить

$$M = \overline{ab} = M_к - M_к \Omega/\Omega_х. \qquad (10.17)$$

Подставив (10.17) в (10.16), получим дифференциальное уравнение

$$d\Omega/dt + M_к/(J\Omega_х) - M_к/J = 0, \qquad (10.18)$$

решение которого запишется как

$$\Omega = \Omega_х \left(1 - e^{-t/T_м}\right), \qquad (10.19)$$

где электромеханическая постоянная времени

$$T_м = J\Omega_х/M_к \qquad (10.20)$$

представляет собой время, в течение которого угловая скорость двигателя достигает 0,633 от угловой скорости холостого хода: $\Omega_х = 2\pi n_х/60$ (рис. 10.12).

Электромеханическая постоянная времени тем меньше, чем больше пусковой момент и меньше момент инерции и частота вращения холостого хода. Так как у реального двигателя механиче-

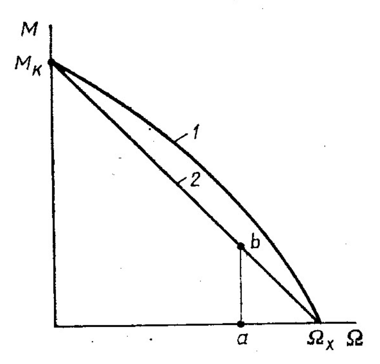


Рис. 10.11. Реальная (1) и линеаризованная (2) механические характеристики ИД переменного тока

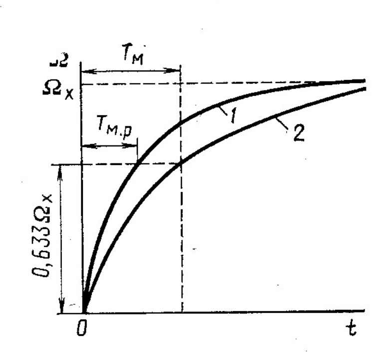


Рис. 10.12. Кривые разгона исполнительного двигателя при реальной (1) и идеальной (2) механических характеристиках

ская характеристика всегда проходит выше идеальной, то его ротор будет разгоняться быстрее и электромеханическая постоянная времени реального ИД, найденная опытным путем, будет несколько меньше, чем у идеального двигателя: $T_{м.р} < T_м$ (рис. 10.12).

При опытном определении $T_м$ двигатель переменного тока следует включать в двухфазную сеть для большей линейности механической характеристики и приближения кривой $\Omega = f(t)$ к экспоненциальной. Для конденсаторных ИД при этом надо так подобрать напряжение на обмотке возбуждения, чтобы пусковой момент остался неизменным. Для ИД с относительно большей нелинейностью механической характеристики время, за которое достигается угловая скорость $\Omega = 0,633\Omega_х$, является лишь условным показателем быстродействия.

Значения $T_м$ при круговом поле для ИД переменного тока мощностью до 40—60 Вт приведены в табл. 10.3.

Таблица 10.3

Тип двигателя	Электромеханическая постоянная времени $T_м$, с, при частоте питающей сети, Гц	
	50	400—500
С полым немагнитным ротором	0,005—0,160	0,015—0,280
С ротором типа «беличья клетка» (сквозной конструкции)	0,007—0,120	0,010—0,080
С полым ферромагнитным ротором	1,00—2,00	1,50—3,00

Так как ИД переменного тока имеет нелинейную регулировочную характеристику $\Omega_x = f(\alpha)$, а его пусковой момент $M_к$ зависит от коэффициента сигнала $\alpha = U_у/U_{у.н}$ линейно, то при уменьшении α отношение $\Omega_x/M_к$ и, следовательно, постоянная времени $T_м$ увеличиваются.

Для ИД постоянного тока с наиболее распространенным видом управления — якорным — электромеханическая постоянная времени несколько больше, чем для ИД с полым немагнитным ротором, и ее значение не зависит от коэффициента сигнала, так как зависимость $M_к = f(\alpha)$ и регулировочные характеристики этих двигателей линейны [2].

В качестве объекта испытания рекомендуется использовать ИД переменного или постоянного тока, у которых разгон происходит больше чем за 5—6 периодов переменного тока, используемого в качестве масштаба времени.

Данные ИД переменного и постоянного тока приведены в табл. 10.4.

Таблица 10.4

Параметр	Данные исполнительных двигателей разных типов				
	ДИД-1ТА	ДИД-5ТА	ДКИ-16-12ТВ	ДПМ-35	ДПР-72
f, Гц	400	400	400	постоянный ток	
$M_к \cdot 10^{-4}$, Н·м	15,4	216	295	1400	4600
$J \cdot 10^{-7}$, кг·м^2	0,78	24,5	20,1	60,8	76,4
n_x, об/мин	18 000	6000	10 000	9800	6400

Наряду с механическим переходным процессом при подаче управляющего сигнала $U_у$ происходит электромагнитный переходный процесс, обусловленный изменением тока в обмотке управления. Однако процесс этот быстро затухает, а характеризующая его электромагнитная постоянная времени $T_э$ в десятки раз меньше $T_м$. Таким образом, наибольший интерес при исследовании динамических характеристик ИД представляет определение $T_м$.

Цель работы — ознакомление с методикой определения электромеханической постоянной времени.

ПРОГРАММА РАБОТЫ

А. Экспериментальные исследования

1. Проверить направление вращения испытуемого и контрольного двигателей.

2. Измерить частоту вращения испытуемого двигателя при холостом ходе.

3. Ознакомиться с устройством и принципом действия измерителя постоянной времени.

4. Снять осциллограмму разгона ИД.

Б. Расчеты и построения

1. Обработать осциллограмму разгона ИД и определить электромеханическую постоянную времени.

2. Рассчитать электромеханическую постоянную времени при идеализированной механической характеристике ИД.

ПОЯСНЕНИЯ И УКАЗАНИЯ

Для измерения электромеханической постоянной времени $T_м$ ИД используется специальный магнитоэлектрический измеритель, который фиксирует с помощью шлейфового осциллографа время

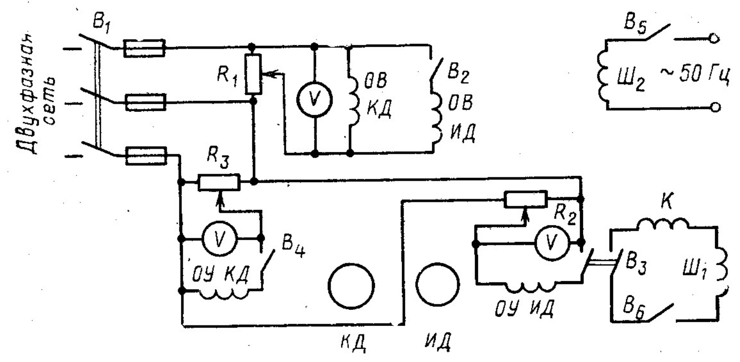


Рис. 10.13. Схема для определения электромеханической постоянной времени

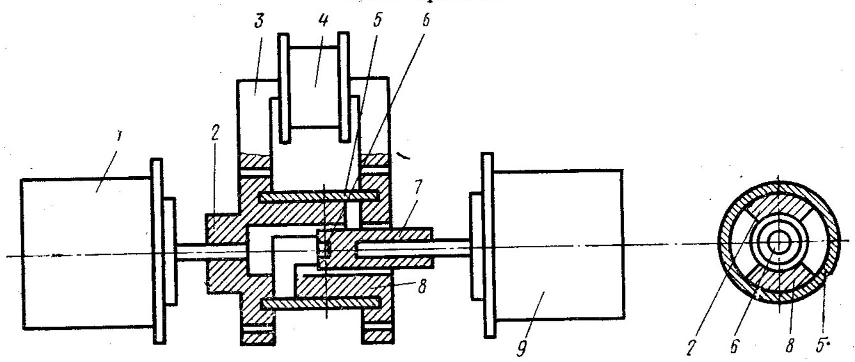


Рис. 10.14. Устройство магнитоэлектрического измерителя

разгона испытуемого двигателя до частоты вращения, равной 0,633 от установившейся при холостом ходе.

Для измерения $T_м$ применяется схема, приведенная на рис. 10.13. Обмотки возбуждения *ОВ* и управления *ОУ* исследуемого ИД и контрольного ИД двигателей включаются в двухфазную сеть с общим проводом, полученную из трехфазной с помощью индукционного регулятора (см. рис. 8.7, *б*). На схеме: *К* — катушка измерителя; $Ш_1$, $Ш_2$ — шлейфы осциллографа; B_1—B_6 — выключатели.

Конструкция измерителя показана на рис. 10.14. Он состоит из неподвижного магнитопровода *3* с катушкой *4*, закрепляемой вместе с контрольным двигателем на специальной стойке, и подвижного магнитопровода, расположенного на валу контрольного двигателя *1*. Подвижный магнитопровод имеет две стальные втулки *2* и *8* с выступами, образующими полюса. Втулки соединены алюминиевой трубкой *5*. На вал исследуемого двигателя *9* надевается легкая алюминиевая втулка *7* с запрессованным в нее намагниченным в поперечном направлении постоянным магнитом *6*, находящимся в расточке подвижного магнитопровода. Когда полюсы магнита и подвижного магнитопровода совпадают, магнитный поток, проходящий через катушку, максимальный, когда не совпадают — минимальный. Таким образом, частота и амплитуда ЭДС, наводимой в катушке (рис. 10.13), определяются разностью частот вращения *КД* и *ИД*.

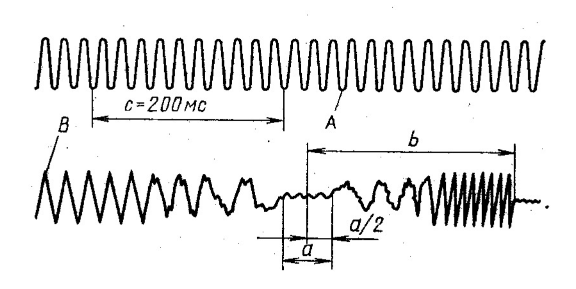


Рис. 10.15. Осциллограмма разбега исполнительного двигателя

Перед началом работы все выключатели на схеме (рис. 10.13) должны находиться в выключенном положении. Вначале надо включить выключатели B_1 и B_2 и потенциометром R_1 установить номинальные напряжения возбуждения; потенциометром R_2 установить номинальное напряжение управления *ИД*; включить выключатель B_3 и измерить частоту вращения холостого хода *ИД*. Затем следует выключить B_3; включить B_4 и потенциометром R_3 установить угловую скорость *КД* $\Omega=0{,}633\Omega_x$. При этом следует убедиться, что валы двигателей *ИД* и *КД* вращаются в одну сторону.

Измерение частот вращения холостого хода у *ИД* и $n=0{,}633n_x$ у *КД* при наличии двух выходных концов вала можно производить стробroom, одного — с помощью частотомера, включаемого в цепь катушки измерителя *К*.

При измерении постоянной времени следует, включив выключатель B_5, подать сетевое напряжение — масштаб времени — на шлейф $Ш_2$. Затем включить выключатель B_6, подготовить шлейф $Ш_1$ к работе, запустить бумагу или пленку и выключателем B_3 включить испытуемый двигатель. В первый момент частота наводимой в катушке измерителя ЭДС, а следовательно, и тока, записываемого шлейфом, определяется частотой вращения *КД*. Затем *ИД* начинает догонять *КД* и частота уменьшается. Момент равенства частот вращения двигателей четко фиксируется на осциллограмме. Искомая электромеханическая постоянная времени $T_м$ определяется временем от начала разгона испытуемого двигателя до момента прохождения частоты ЭДС катушки измерителя через нуль (рис.

10.15). На осциллограмме разбега *ИД*: *А* — масштаб времени (напряжение сети $f=50$ Гц), *В* — кривая тока в измерительной катушке *К*. На рис. 10.15 показан также интервал времени $t=a$ прохождения ЭДС измерительной катушки через нуль. Как показано на рис. 10.15, масштаб времени $m_t=200$/с (в данном примере 200 мс составляет *с* мм), а разгон *ИД* происходит на длине осциллограммы *b* мм. Электромеханическая постоянная времени $T_М=m_tb=$ $=218$ мс.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

После снятия и проявления осциллограмма разгона ИД обрабатывается, как указано выше, и по ней определяется электромеханическая постоянная времени. Для *ИД* следует рассчитать постоянную времени $T_М$ по формуле (10.20) и сравнить расчетную величину с экспериментальной.

Вопросы для самопроверки

1. Какой вид имеет механическая характеристика ИД?
2. Каким показателем оценивается быстродействие ИД?
3. Как влияет на быстродействие ИД коэффициент сигнала?
4. Как можно рассчитать электромеханическую постоянную времени ИД?
5. Как определить опытным путем электромеханическую постоянную времени?
6. Какие переходные процессы протекают в ИД? Каково соотношение их постоянных времени?
7. Каково среднее значение электромеханической постоянной времени у ИД переменного тока с полым немагнитным ротором? ротором типа «беличья клетка»?
8. От каких величин зависит значение электромеханической постоянной времени?

Глава 11

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ МИКРОМАШИН НА РАСЧЕТНОМ СТОЛЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

§ 11.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Двухфазная асинхронная машина обычно несимметричная. Асимметрия ее обусловлена схемой включения: питание от несимметричной системы напряжений, неравенство сопротивлений фаз,— и связана в первую очередь с принципом действия. Расчет характеристик двухфазных машин значительно сложнее, чем симметричных трехфазных. Для их определения целесообразно использование различных средств механизации и автоматизации расчетных работ, в частности моделирование асинхронной машины на расчет-

ном столе переменного тока. При этом в определенном масштабе воспроизводится схема замещения исследуемой машины со всеми активными и реактивными сопротивлениями и источниками напряжения.

Для моделирования на расчетном столе требуются совмещенные схемы замещения. В них отражена связь токов и напряжений прямой и обратной последовательностей с токами и напряжениями фаз, а также с токами ротора по продольной и поперечной осям.

В работе используется мостиковая схема замещения двухфазной асинхронной машины (рис. 11.1), которая позволяет достаточно полно ее исследовать. Ей соответствуют уравнения

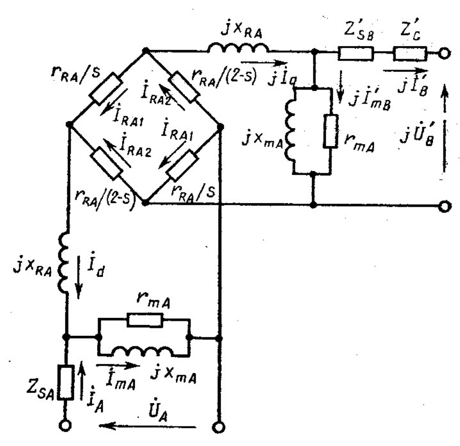


Рис. 11.1. Мостиковая совмещенная схема замещения

$$\dot{U}_A=\dot{I}_A Z_{SA}+j\dot{I}_{mA}x_{mA}; \qquad (11.1)$$

$$j\dot{U}'_B=j\dot{I}'_B(Z'_{SB}+Z'_C)+j(j\dot{I}'_{mB})x_{mA}; \qquad (11.2)$$

$$0=j\dot{I}_{mA}x_{mA}+j\dot{I}_{Rd}x_{RA}+\dot{I}_{RA1}r_{RA}/s+\dot{I}_{RA2}r_{RA}/(2-s); \qquad (11.3)$$

$$0=j(j\dot{I}'_{mB})x_{mA}+j(j\dot{I}_{Rq})x_{RA}-\dot{I}_{RA1}r_{RA}/s+\dot{I}_{RA2}r_{RA}/(2-s); \qquad (11.4)$$

$$\dot{I}_{Rd}=\dot{I}_{RA1}+\dot{I}_{RA2}; \qquad (11.5)$$

$$j\dot{I}_{Rq}=-\dot{I}_{RA1}+\dot{I}_{RA2}; \qquad (11.6)$$

$$\dot{I}_{mA}=\dot{I}_A+\dot{I}_{Rd}; \qquad (11.7)$$

$$\dot{I}'_{mB}=\dot{I}'_B+\dot{I}_{Rq}, \qquad (11.8)$$

где $\dot{I}_B'=\dot{I}_B/k$, $Z'_{SB}=Z_{SB}/k^2$, $Z_C'=Z_C/k^2$ — ток и сопротивления цепи фазы B, приведенные к обмоточным данным фазы A; I_{Rd}, I_{Rq} — токи ротора по продольной и поперечной осям.

При моделировании этой схемы на расчетном столе можно измерить электромагнитные мощности прямой и обратной последовательностей, определяющие вращающий момент:

$$M_э=\frac{2}{\Omega_c}\left[I^2_{RA1}r_{RA}/s-I^2_{RA2}r_{RA}/(2-s)\right],$$

где $\Omega_c=2\pi f/p$ — угловая скорость (синхронная).

Набрав мостиковую схему на расчетном столе, можно определить полностью рабочие и пусковые характеристики машины: токи и мощности потребления фаз, электромагнитные мощности и моменты при различных частотах вращения.

Мостиковую схему замещения можно упростить, сохранив возможность измерения тех же величин при моделировании, если перенести намагничивающий контур к мостику сопротивлений r_{RA}/s и $r_{RA}/(2-s)$ (рис. 11.2). Коэффициент преобразования $c_R = 1 + x_{RA}/x_{mA}$.

Преобразованные параметры связаны с исходными соотношениями

$$x''_{mA} = x_{mA}/c_R;\; x''_{SA} = x_{SA} + x_{RA}/c_R;\; r''_{RA} = r_{RA}/c_R^2.$$

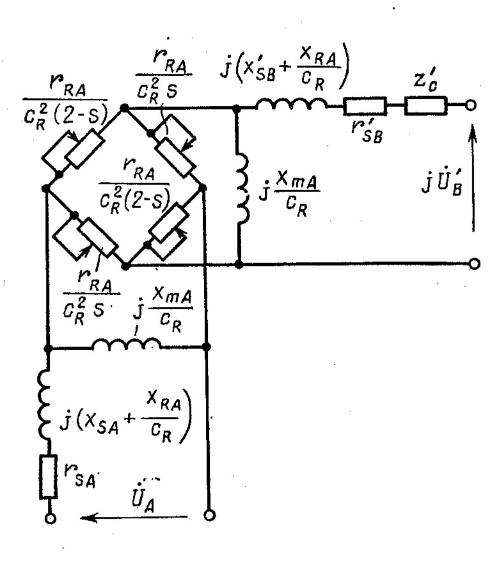


Рис. 11.2. Преобразованная схема замещения

Объектами моделирования на расчетном столе могут быть следующие асинхронные машины с двумя обмотками на статоре:

а) конденсаторный двигатель;

б) однофазный двигатель с пусковыми элементами;

в) исполнительный двигатель;

г) датчик момента;

д) тахогенератор.

Цель исследования — изучить с помощью математической модели характеристики двухфазных асинхронных машин, определить основные выходные показатели и проанализировать влияние на них параметров схемы замещения.

ПРОГРАММА ИССЛЕДОВАНИЙ

А. Экспериментальные исследования

1. Ознакомиться с конструкцией и схемой расчетного стола.

2. Определить масштабы сопротивлений, напряжений, токов и мощностей, рассчитать сопротивления и напряжения модели и выставить их на расчетном столе.

Примечание. На расчетном столе по указанию преподавателя моделируется одна из машин, параметры которых приведены в табл. 11.1.

3. Для моделируемой машины исследовать методами планирования эксперимента влияние параметров схемы замещения и фазосмещающего элемента на выходные показатели (по указанию преподавателя):

а) для неуправляемых двигателей — КПД, номинальное скольжение, кратность пускового момента, кратность максимального момента, скольжение при максимальном моменте;

б) для исполнительных двигателей — нелинейность механической характеристики при различных способах управления (амплитудное, фазовое, амплитудно-фазовое) и коэффициентах сигнала;

в) для асинхронного тахогенератора — крутизну выходной характеристики $U_г/n$;

г) для датчика момента — крутизну выходной характеристики $M_к/U_у$.

Б. Расчеты и построения

На основании результатов экспериментального исследования рассчитать на ЭВМ коэффициенты полиномов, оценить значимость коэффициентов и проверить адекватность полиномов.

ПОЯСНЕНИЯ И УКАЗАНИЯ

Моделирование производится на стенде, схема которого приведена на рис. 11.3. Для моделирования используется преобразованная мостиковая схема замещения (рис. 11.2), в которой *индуктивные элементы заменены емкостными,* а емкостные — индуктивными. Целесообразность этой замены объясняется тем, что схема замещения содержит четыре индуктивных сопротивления и только одну емкость. Емкостные элементы удобны для использования в модели, так как они имеют минимальное собственное активное сопротивление. При этом токи и напряжения заменяются комплексно-сопряженными значениями.

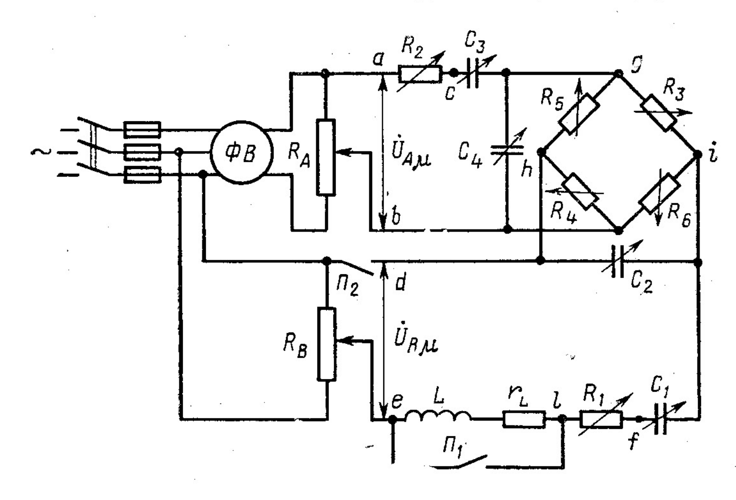


Рис. 11.3. Схема расчетного стола

Модель содержит магазины активных сопротивлений и емкостей, постоянную индуктивность и источники питания, регулируемые по амплитуде и фазе. Магазины активных сопротивлений — декадные, они имеют пределы 0,1—1 000 000 Ом; магазины емко-

Тип машины	Обозначение	$M_к$, г·см / $P_н$, Вт	f, Гц / $2p$	C, мкФ
Неуправляемые двигатели:				
конденсаторный с $C_р$	КД50	— / 60	50 / 2	4
конденсаторный с $C_р$ и $C_п$	RAC-152M	— / 250	50 / 2	$C_р=8$ $C_в=35$
с повышенным активным сопротивлением в пусковой фазе	4AAE56B4	— / 90	50 / 4	—
Исполнительные двигатели с полым немагнитным ротором	АДП-362	1700 / 19	50 / 2	6,5
	ДИД-3ТВ	90 / 3	400 / 4	—
Исполнительные двигатели с ротором типа «беличья клетка»	ДКИ-25-12ТВ	65 / 2,5	400 / 4	0,22
	ДМ-0,1ТВ	6 / 0,1	400 / 4	—
Датчик момента с полым немагнитным ротором	ДМ	50 / —	400 / 12	1***
Тахогенератор с полым немагнитным ротором ****	АТИ	—	400 / 4	—

* Напряжения $\dot{U}_A$ и $\dot{U}_B$ совпадают по фазе.

** Напряжения $\dot{U}_A$ и $\dot{U}_B$ сдвинуты по фазе на 90° (сдвиг схемой).

*** Конденсатор в цепи управления.

**** Крутизна 5 мВ/(об/мин).

стей — штепсельные, их пределы 0,1—111,1 мкФ. Используется индуктивность $L=111$ мГн с собственным активным сопротивлением 32 Ом. Источники питания со стабилизированной частотой $f=400$ Гц (500 или 1000 Гц) позволяют плавно регулировать потенциометрами R_A, R_B напряжения 0—24 В и фазы 0—360° с помощью электромеханического фазовращателя $ФВ$.

На модели устанавливаются в масштабе сопротивления преобразованной схемы замещения:

$$x''_{SA}=x_{SA}+x_{RA}/c_R;\ r''_{SA}=r_{SA};$$

Таблица 11.1

Главная фаза (управления)						Вспомогательная фаза (возбуждения)			
U_A, В	r_{SA}	x_{SA}	x_{mA}	r_{RA}	x_{RA}	U_B, В	k	r_{SB}	x_{SB}
	Ом							Ом	
220	91	65	1310	100	48	220*	0,805	57	42,0
220	7,5	7	266	10	7	220*	1,23	14,6	11,1
220	30	19	191	20	23	220*	1,1	69	5,3
110	27,5	19	213	236	0	120*	1,34	49,5	33,1
36	11	14	58	83	0	30**	0,90	9,8	11,4
36	21	27	192	142	32	115*	3,02	200	246,0
36	150	148	265	175	47	18**	1,19	220	210,0
40	96	68	88,7	233	0	40*	0,91	116	82,3
—	6,1	25	78,7	267	0	110	0,44	32	128,0

$$x''_{SB}=x_{SB}/k^2+x_{RA}/c_R=x'_{SB}+x_{RA}/c_R;\quad r''_{SB}=r_{SB}/k^2=r'_{SB};$$

$$x''_{mA}=x_{mA}/c_R;\quad r''_{RA}/s=r_{RA}/(c_R^2 s);$$

$$r''_{RA}/(2-s)=r_{RA}/[c_R^2(2-s)],$$

где $c_R=1+x_{RA}/x_{mA}$.

Кроме того, от источника питания подаются два напряжения фаз: $\overset{*}{U}_A$ и $-j\overset{*}{U}_B$. Поскольку модель обращенная, напряжения фаз должны быть комплексно-сопряженными, причем напряжение $\overset{*}{U}_B$ поворачивается по фазе на $-90°$.

Выбор масштабов поясняется в табл. 11.2. Основными являются масштабы сопротивлений μ_Z и напряжений μ_U, они должны быть выбраны таким образом, чтобы можно было полученные величины Z и U установить на модели, исходя из ее технических возможностей. Выбор μ_Z часто лимитируется сопротивлениями r''_{SB} и x''_{SB}

Таблица 11.2

Величины		Масштабные коэффициенты
действительные	на модели	
$\dot{U}_A$	$\dot{U}_{A\mu}=\overset{*}{\dot{U}}_A/\mu_U$	$\mu_U=\dfrac{U}{U_\mu}$
$\dot{U}'_B$	$\dot{U}_{B\mu}=-j\overset{*}{\dot{U}}{}'_B/\mu_U$	
r'_{SB}	$R_1+r_L=r'_{SB}/\mu_Z$	$\mu_Z=\dfrac{z}{z_\mu}$
r_{SA}	$R_2=r_{SA}/\mu_Z$	
r''_{RA}/s	$R_3=R_4=r''_{RA}/(s\mu_Z)$	
$r''_{RA}/(2-s)$	$R_5=R_6=r''_{RA}/[(2-s)\mu_Z]$	
$x''_{SB}-x'_C$	$1/(\omega C_1)-\omega L=\left(x''_{SB}-x'_C\right)/\mu_Z$	
x''_{SA}	$1/(\omega C_2)=x''_{SA}/\mu_Z$	
x''_{mA}	$1/(\omega C_3)=1/(\omega C_4)=x''_{mA}/\mu_Z$	
$\dot{I}$	$\dot{I}_\mu=\overset{*}{I}\mu_I$	$\mu_I=\mu_U/\mu_Z$
P	$P_\mu=P\mu_P$	$\mu_P=\mu_U^2/\mu_Z$

обмотки фазы B и сопротивлением x_C фазосмещающего конденсатора (учитывая наличие в этой фазе на модели сопротивлений $x_L=\omega L$ и r_L):

$$r''_{SB}=\mu_Z(R_1+r_L);$$

$$x''_{SB}-x_C/k^2=\mu_Z[1/(\omega C_1)-\omega L].$$

При отсутствии в фазе B емкостного фазосмещающего элемента индуктивность L целесообразно закоротить переключателем $П_1$ (рис. 11.3) для облегчения выбора масштаба сопротивления. Масштабы токов μ_I и мощностей μ_P являются производными и рассчитываются по выбранным основным масштабам.

Измерения на модели производятся электронными приборами, собственное потребление которых практически равно нулю. Измеряются значения и фазы напряжений U_{ab}, U_{ac}, U_{de}, U_{lf} и значения

напряжений U_{gi}, U_{gh}. По результатам этих измерений определяются с учетом масштаба все электрические величины:

напряжения фаз A и B

$$U_A = U_{ab}\mu_U; \tag{11.9}$$

$$U_B = kU_{de}\mu_U; \tag{11.10}$$

токи фаз A и B

$$I_A = U_{ac}\mu_I/(r_{SA}/\mu_Z); \tag{11.11}$$

$$I_B = U_{tf}\mu_I/[k(r_{SB}/(k^2\mu_Z) - r_L)]; \tag{11.12}$$

мощности потребления фаз A и B

$$P_A = U_A I_A \cos\left(\widehat{U_{ab}, U_{dc}}\right); \tag{11.13}$$

$$P_B = U_B I_B \cos\left(\widehat{U_{de}, U_{ef}}\right); \tag{11.14}$$

электромагнитные мощности прямой и обратной последовательностей

$$P_{э1} = 2U_{gi}^2 s\mu_P/(r_{RA}/\mu_Z); \tag{11.15}$$

$$P_{э2} = 2U_{gh}^2(2-s)\mu_P/(r_{RA}/\mu_Z). \tag{11.16}$$

Полученные величины позволяют рассчитать электромагнитный момент и механическую мощность на валу машины:

$$M = P_{э1}/\Omega_с + P_{э2}/(-\Omega_с); \tag{11.17}$$

$$P_R = (1-s)(P_{э1} - P_{э2}). \tag{11.18}$$

Моделирование на расчетном столе позволяет при известных параметрах схемы замещения машины быстро получить характеристики и определить по ним основные выходные показатели. Основные характеристики и показатели неуправляемых асинхронных двигателей рассмотрены в § 5.1, исполнительных асинхронных двигателей — в § 8.1, асинхронных тахогенераторов — в § 9.1.

При исследовании неуправляемых двигателей для нахождения номинального скольжения необходимо, пользуясь формулами (11.15), (11.16) и (11.18), построить характеристику $P_R = f(s)$. При номинальном скольжении по формулам (11.13)—(11.18) определяют КПД $\eta = P_R/(P_A + P_B)$ и номинальный момент $M_н$. Чтобы найти максимальный момент и соответствующее ему скольжение, строят механическую характеристику $M = f(s)$ исследуемого двигателя (см. рис. 5.9). Пусковой момент определяют при $s=1$.

Для ИД с использованием (11.15)—(11.17) снимают механическую характеристику и по ней определяют ее нелинейность (см. рис. 8.12). Способ управления ИД и коэффициент сигнала задаются преподавателем.

При исследовании тахогенератора на расчетный стол от источника питания подается только напряжение $\overset{*}{U}_{A\mu}$, при этом переключатель $П_2$ (рис. 11.3) выключается. Напряжение $\overset{*}{U}_{B\mu}$ будет являться выходным напряжением тахогенератора. Измерив его на расчетном столе для нескольких значений частоты вращения $n=$

$=n_c(1-s)$, построим выходную характеристику тахогенератора $U_B=f(n)$ и определим ее крутизну U_B/n.

Датчик момента используется в следящих системах для управления моментом на валу при неподвижном роторе. Его можно рассматривать как ИД при $s=1$. Выходной характеристикой датчика момента является зависимость пускового момента от напряжения управления. Поскольку эта зависимость имеет линейный характер, для определения крутизны выходной характеристики достаточно найти пусковой момент только при $U_у=U_{ун}$.

Возможность быстро изменить установленные на расчетном столе значения параметров схемы замещения позволяет исследовать их влияние на выходные показатели машины. Наиболее эффективно можно обобщить и проанализировать результаты этих исследований с помощью математической теории эксперимента.

Вопросы для самопроверки

1. Сформулируйте понятие «математическая модель».
2. В чем сущность моделирования асинхронной машины на расчетном столе?
3. Поясните выбор и последовательность определения масштабов при моделировании.
4. Какие величины и каким образом могут быть определены при моделировании различных типов асинхронных машин?
5. Перечислите преимущества моделирования на расчетном столе.
6. Какие типы электрических машин могут моделироваться на используемом расчетном столе?
7. Поясните методику определения на расчетном столе исследуемого показателя электрической машины.

§ 11.2. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫХОДНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Математической основой теории эксперимента являются методы теории вероятностей и математической статистики, практически теория эксперимента опирается на современную электронно-вычислительную технику, ее основное приложение — математическая обработка результатов эксперимента. При этом решаются следующие вопросы: подбор эмпирических формул и оценка их параметров, оценка истинных значений измеряемых величин и точности измерений, исследование корреляционных зависимостей, а также некоторые вопросы анализа — интегрирование, дифференцирование, интерполяция.

Рассмотрим вопросы подбора эмпирических формул, которые решаются методами планирования эксперимента (ПЭ). Эти методы позволяют выбрать стратегию исследования путем постановки опытов по некоторой заранее составленной схеме, обладающей оптимальными свойствами и позволяющей получить зависимость между многочисленными входными параметрами процесса $x_1, x_2, x_3, \ldots, x_n$ и его выходными показателями $y_1, y_2, y_3, \ldots, y_m$ в виде полинома:

$$y_k=b_0+\sum_{i=1}^{n} b_i x_i+\sum_{i<j}^{n} b_{ij} x_i x_j+\ldots \quad (11.19)$$

Для получения подобной зависимости ставится минимальное число опытов.

Существуют различные планы экспериментов, позволяющие получить те или иные математические модели исследуемого процесса в виде полиномов [14]. В каждом из планов число основных опытов равно числу неизвестных коэффициентов полинома и показателей степени. Для проверки точности модели выполняются дополнительные опыты. В результате реализации основных опытов получаем систему уравнений, решая которую находим неизвестные коэффициенты и показатели степени полиномов. Планирование эксперимента позволяет найти такое сочетание опытов, при котором расчет неизвестных коэффициентов полиномов будет наиболее простым.

Процесс исследования некоторого выходного показателя для получения его математической модели методом ПЭ состоит из нескольких этапов:

1) выявления входных независимых переменных и пределов их варьирования;

2) изучения характера зависимости исследуемого показателя от входных параметров и на этой основе выбора плана эксперимента;

3) реализации запланированных опытов, расчета коэффициентов;

4) проверки адекватности полученной математической модели.

При исследовании характеристик асинхронной машины на расчетном столе в качестве входных независимых переменных целесообразно принять относительные параметры преобразованной схемы замещения (см. рис. 11.2). За базовую величину удобно принять приведенное активное сопротивление ротора. В этом случае будем иметь три независимые переменные: относительное сопротивление взаимной индукции, относительное активное сопротивление обмотки статора и относительное сопротивление рассеяния соответственно, т. е.

$$\xi'_m = x_{mA} c_R / r_{RA};$$
$$\rho'_S = r_{SA} c_R^2 / r_{RA};$$
$$\xi'_S = x_{SA} c_R^2 / r_{RA} + x_{RA} c_R / r_{RA}.$$

Диапазон изменения параметров принимаем равным $\pm 10\%$ от среднего значения в соответствии с данными табл. 11.1. При этом сравнительно небольшом диапазоне характер исследуемых зависимостей можно считать линейным и использовать для получения полиномиальных зависимостей **полный факторный эксперимент** (ПФЭ).

Важнейшая особенность ПЭ состоит в том, что он использует нормализованные значения входных независимых переменных

$$\bar{x}_i = (x_i - x_{i\,\text{ср}})/\Delta x_i, \qquad (11.20)$$

где

$$x_{i\,\text{ср}} = (x_{i\,\text{макс}} + x_{i\,\text{мин}})/2; \qquad (11.21)$$

$$\Delta x_i = (x_{i\,\text{макс}} - x_{i\,\text{мин}})/2. \qquad (11.22)$$

Очевидно, что нормализованные переменные изменяются от —1 до +1. Такая нормализация, во-первых, облегчает расчет коэффициентов полинома, во-вторых, позволяет по значению коэффициентов оценить степень влияния на исследуемый показатель различных входных величин.

Для определения всех коэффициентов полинома при трех независимых переменных необходимо провести $2^3=8$ опытов, указанных в матрице планирования (табл. 11.3). В ней знаком «+» обозначены значения переменных, равные +1, знаком «—»— переменные, равные —1. Результаты опытов заносятся в графу «Значение исследуемого показателя из опыта». Коэффициенты полинома находятся следующим образом:

$$b_i=[C][Y]/N, \qquad (11.23)$$

где N — число опытов; $[C]$ — матрица-столбец значений независимой переменной в соответствии с табл. 11.3; $[Y]$ — матрица-столбец значений функции цели в соответствии с табл. 11.3.

Таблица 11.3

Номер строки	Независимые переменные								Значение исследуемого показателя	
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_{12}	x_{13}	x_{23}	x_{123}	из опыта	по полиному
1	+	—	—	—	+	+	+	—		
2	+	+	—	—	—	—	+	+		
3	+	—	+	—	—	+	—	+		
4	+	+	+	—	+	—	—	—		
5	+	—	—	+	+	—	—	+		
6	+	+	—	+	—	+	—	—		
7	+	—	+	+	—	—	+	—		
8	+	+	+	+	+	+	+	+		
9	+	0	0	0	0	0	0	0		
10	+									

Примечания: 1. x_0, x_{12}, x_{13}, x_{23}, x_{123} — фиктивные переменные: $x_0=1$; $x_{12}=x_1x_2$; $x_{13}=x_1x_3$; $x_{23}=x_2x_3$; $x_{123}=x_1x_2x_3$. 2. Строки 1—8 — матрица ПФЭ; строки 9 и 10 отражают опыты в центре плана и произвольной точке внутри плана для проверки адекватности полинома; последняя графа «Значение исследуемого показателя по полиному» заполняется только для строк 9 и 10.

Для оценки точности полученного полинома проводят еще два дополнительных опыта: при нулевых значениях независимых переменных и произвольном сочетании их, — а затем опытные значения сравнивают с вычисленными с помощью полиномов. Результаты сравнения заносят в табл. 11.3.

Кроме того, по значениям коэффициентов полиномов следует сделать выводы о степени влияния каждого из параметров схемы замещения на исследуемый показатель машины.

Пример. Исследуем кратность пускового момента двигателя с пусковым конденсатором для привода компрессора торгового холодильника.

Основные данные двигателя: $P_н=250$ Вт; $2p=2$; $f=50$ Гц; $s_н=2{,}5\%$; $U_н=220$ В; $C_п=60$ мкФ; $M_н=0{,}816$ Н·м; $k_п=5$.

Примечание. По условиям применения двигатель спроектирован с повышенной кратностью пускового момента.

Параметры схемы замещения двигателя (Ом): $r_{SA}=6{,}26$; $x_{SA}=6{,}08$; $x_{RA}=6{,}87$; $x_{mA}=183$; $r_{RA}=8{,}47$; $r_{SB}=10{,}0$; $x_C=53{,}05$. Коэффициент трансформации $k=1{,}3$.

Относительные параметры схемы замещения:

$$\rho_S=r_{SA}/r_{RA}=0{,}739;\quad \xi_S=x_{SA}/r_{RA}=0{,}717;$$

$$\xi_R=x_{RA}/r_{RA}=0{,}811;\quad \xi_m=x_{mA}/r_{RA}=21{,}6;$$

$$\xi_C=x_C/(k^2 r_{RA})=3{,}71.$$

Относительные параметры преобразованной схемы замещения:

$$c_R=1+x_{RA}/x_{mA}=1{,}04;\quad \rho_S'=\rho_S c_R^2=0{,}8;\quad \xi_C'=\xi_C c_R^2=4{,}01;$$

$$\xi_S'=\xi_S c_R^2+\xi_R c_R=1{,}62;\quad \xi_m'=\xi_m c_R=22{,}5.$$

Исследование кратности пускового момента проводилось при колебании относительных параметров преобразованной схемы замещения в пределах $\pm10\%$. Опыты проводились на расчетном столе переменного тока в соответствии с матрицей планирования (табл. 11.3). Результаты опытов приведены в последней колонке матрицы (табл. 11.4). Там же даны абсолютные и нормализованные значения относительных параметров схемы замещения во всех опытах. Кроме того, в матрице имеются результаты опытов в центре плана и произвольной точке внутри плана, приведенных для оценки точности полинома.

Расчет коэффициентов полинома ведется по формуле (11.23):

$$b_0=(+1\cdot4{,}90+1\cdot4{,}88+1\cdot5{,}25+1\cdot5{,}25+1\cdot4{,}91+1\cdot4{,}90+$$
$$+1\cdot5{,}30+1\cdot5{,}30)/8=5{,}086;$$

$$b_1=(+1\cdot4{,}90-1\cdot4{,}88+1\cdot5{,}25-1\cdot5{,}25+1\cdot4{,}91-1\cdot4{,}90+$$
$$+1\cdot5{,}30-1\cdot5{,}30)/8=0{,}004.$$

Аналогично рассчитываются и другие коэффициенты полинома: $b_2=-0{,}189$; $b_3=-0{,}016$; $b_{12}=0{,}004$; $b_{13}=0{,}001$; $b_{23}=0{,}009$; $b_{123}=0{,}001$.

Искомый полином кратности пускового момента

$$k_п=5{,}086+0{,}004\,x_1-0{,}189\,x_2-0{,}016\,x_3+0{,}004\,x_1x_2+$$
$$+0{,}001\,x_1x_3+0{,}009\,x_2x_3+0{,}001\,x_1x_2x_3,$$

где нормализованные значения независимых переменных согласно (11.20)—(11.22)

$$x_1=(\xi_m'-22{,}5)/2{,}25;\quad x_2=(\rho_S'-0{,}8)/0{,}08;\quad x_3=(\xi_S'-1{,}62)/0{,}162.$$

В табл. 11.4 для опытов 9 и 10 в последней колонке в скобках приведены результаты расчета кратности пускового момента, найденные по полиному. Сравнение их с опытными данными позволяет сделать вывод о хорошей адекватности полученного полинома.

Таблица 11.4

Номер строки	Независимые переменные								$k_п$
	x_0	ξ'_m	ρ'_S	ξ'_S	x_{12}	x_{13}	x_{23}	x_{123}	
		x_1	x_2	x_3					
1	+1	24,8	0,879	1,78					
		+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	4,90
2	+1	20,3	0,879	1,78					
		−1	+1	+1	−1	−1	+1	−1	4,88
3	+1	24,8	0,719	1,78					
		+1	−1	+1	−1	+1	−1	−1	5,25
4	+1	20,3	0,719	1,78					
		−1	−1	+1	+1	−1	−1	+1	5,25
5	+1	24,8	0,879	1,46					
		+1	+1	−1	+1	−1	−1	−1	4,91
6	+1	20,3	0,879	1,46					
		−1	+1	−1	−1	+1	−1	+1	4,90
7	+1	24,8	0,719	1,46					
		+1	−1	−1	−1	−1	+1	+1	5,30
8	+1	20,3	0,719	1,46					
		−1	−1	−1	+1	+1	+1	−1	5,30
9		22,5	0,799	1,62					
		0	0	0					5,086 (5,086)
10		23,4	0,759	1,67					
		+0,4	−0,5	+0,3					5,172 (5,175)

Анализ коэффициентов полинома показывает, что наибольшее влияние на кратность пускового момента оказывает относительное активное сопротивление статора $\rho_s'(b_2 = -0,189)$. Коэффициенты полинома, характеризующие влияние относительного сопротивления взаимной индукции ξ_m' и сопротивления рассеяния $\xi_s'(b_1 = 0,004;\ b_3 = 0,016)$, мало значимы, поэтому их можно не учитывать. Незначительны также парные и тройное взаимодействие, поэтому с достаточной точностью можно считать

$$k_п \approx 5,086 - 0,189\, x_2.$$

Вопросы для самопроверки

1. Как находится полиномиальная зависимость выходного показателя от параметров схемы замещения машины? Поясните методику определения коэффициентов полиномов.
2. При каких соотношениях параметров проводились опыты для определения коэффициентов полиномов?
3. Как оценить точность полученного полинома?
4. Проведите анализ полученного полинома и укажите роль отдельных факторов.

Глава 12

ИССЛЕДОВАНИЕ УРОВНЯ ЗВУКА, ВИБРАЦИИ И РАДИОПОМЕХ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МИКРОМАШИНАХ

§ 12.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЯ ВИБРАЦИИ И ЗВУКА В МИКРОМАШИНАХ

Платформа стенда, предназначенного для контроля вибрации при упругой установке электрической машины, должна быть достаточно жесткой, т .е. не должна вносить в результаты измерений существенных искажений из-за резонансов, возможных в платформе. Собственная частота колебаний электрической машины в вертикальном направлении при ее упругой установке, а также частота колебаний относительно горизонтальной оси, проходящей через центр тяжести системы перпендикулярно оси вращения, не должны превышать значения 0,25 от наименьшей частоты вращения при испытании машины [25].

За счет подбора жесткости и расположения упругих элементов обеспечивается собственная частота колебаний. Во всех случаях статическое перемещение платформы под действием массы платформы с установленной испытуемой электрической машиной не должно превышать половины свободного хода амортизатора или половины максимально допускаемого прогиба упругого элемента.

Оценку собственной частоты установки при колебаниях в вертикальном направлении можно проводить по статическому прогибу упругих элементов платформы. Статический прогиб $\delta_{стm}$ (мм) под действием массы платформы с установленной на ней электрической машиной должен быть не менее $\delta_{мин} = 15\ (1000/n)^2$, где n — наименьшая рабочая частота вращения машины при испытании, об/мин.

Частоту собственных колебаний f_0 можно определить одним из двух способов:

1) экспериментально — измерением частоты резонансных колебаний при воздействии на неработающую машину, установленную на амортизаторах или подвешенную упруго, внешним механическим возбудителем, например с помощью вибратора с регулируемой частотой;

2) расчетным путем — по формуле

$$f_0 = [1/(2\pi)]\sqrt{C_q/G}, \quad (12.1)$$

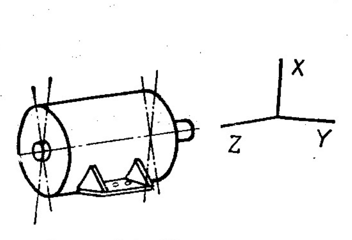


Рис. 12.1. Картина расположения электрической машины относительно осей

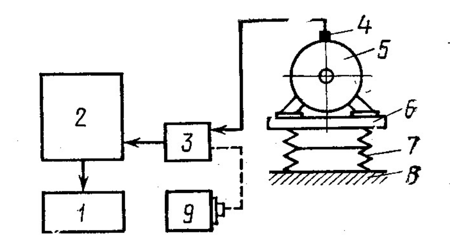


Рис. 12.2. Структурная схема измерительной установки:

1 — самописец; *2* — измерительный усилитель; *3* — предварительный усилитель; *4* — вибропреобразователь; *5* — электрическая машина; *6* — платформа; *7* — амортизаторы; *8* — фундамент

где C_q — динамическая жесткость амортизаторов в направлении действия силы тяжести (берется из каталога или технических условий на амортизаторы).

Точки измерения вибрации выбирают:

а) при упругой установке без дополнительной массы — на подшипниковых щитах по осям X, Y и в направлении оси Z (рис. 12.1) возможно ближе к оси вращения, а также на лапах или фланце машины в направлении, перпендикулярном опорной поверхности, в четырех точках вблизи установочных отверстий. Для малогабаритных электрических машин разрешается перенос точек измерения на корпус машины вблизи подшипниковых щитов;

б) при упругой установке с дополнительной массой — то же, что и в п.а; кроме того, для горизонтальных машин — на платформе в двух точках под подшипниковыми щитами на проекции оси вращения в вертикальном направлении (по оси Y); для вертикальных фланцевых машин, которые нельзя испытывать в горизонтальном положении, — на платформе в двух точках по осям X и Y вблизи фланцев в направлении оси Z;

в) при жесткой установке — на подшипниковых щитах по осям X и Y и в направлении оси Z.

Спектральный анализ вибрации проводят при упругой установке машины без дополнительной массы в точке с максимальным значением вибрации.

Контроль вибрации целесообразно проводить при следующих режимах работы:

а) с номинальной нагрузкой — для электрических машин, нагрузку которых можно осуществить без механических соединений с вспомогательными механизмами и машинами (например, электромашинный преобразователь);

б) при частоте вращения с максимальной вибрацией — для многоскоростных машин и машин с регулируемой частотой вращения;

в) в режиме холостого хода при номинальном напряжении, токе и частоте питающей сети, а также номинальной частоте вращения — для остальных машин.

Измерительная установка, схема которой представлена на рис. 12.2, включает в себя: вибропреобразователь, преобразующий механические колебания в электрические; предварительный усилитель, согласующий выходное сопротивление вибропреобразователя с входным сопротивлением последующих приборов; измерительный усилитель, регистрирующий вибрации исследуемого объекта. Предварительный усилитель производит предварительное усиление и устанавливает род измерений — вибрационной скорости, вибрационного ускорения или вибрационного смещения.

Для проведения спектрального анализа вибрации вместо измерительного усилителя используются соответствующие анализаторы, которые делятся на спектрометры и частотные анализаторы. Спектрометры позволяют исследовать спектр в третьоктавном и октавном диапазонах частот. Частотные анализаторы отличаются узкой полосой пропускания, причем в отличие от спектрометров полоса пропускания остается постоянной во всем диапазоне частот.

Для автоматической записи спектра вибрации используются самописцы уровня, синхронизированные с соответствующими анализаторами. Обычно самописец уровня задает скорость переключения фильтров анализаторов. Логарифмический масштаб самописца позволяет считывать результаты непосредственно с бумажной ленты.

Перед измерением вибрации необходимо настроить отдельные приборы, входящие в измерительный тракт. Настройка и калибровка производятся в соответствии с инструкцией для определенного комплекта приборов.

При исследовании звука шумовыми характеристиками являются:

а) спектр уровней звуковой мощности (октавные уровни звуковой мощности в полосах со среднегеометрическими частотами 65, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 и 8000 Гц);

б) корректированный уровень звуковой мощности;

в) уровень звука на опорном радиусе 3 м (для машин, поставляемых на экспорт);

г) уровень звука на расстоянии 1 м от наружного контура машины;

д) характеристика направленности излучения шума (если показатель направленности превышает 6 дБ по шкале А).

Как уже отмечалось в § 3.1, шумовые характеристики машин могут определяться в свободном звуковом поле, в отраженном звуковом поле или с помощью образцового источника на расстоянии 1 м от наружного контура машины. Вспомогательный (образцовый) источник должен создавать стабильный шум с широким частотным спектром и ненаправленным излучением. При отсутствии образцового источника допускается для проверки помещения использовать испытуемую машину. Метод определения с помощью образцового источника применяется для ориентировочных измерений. Им можно пользоваться при проведении лабораторных работ со студентами.

Измерение шума на расстоянии 1 м от наружного контура машины применяют в условиях, соответствующих требованиям свободного поля.

Особое внимание следует уделять влиянию помех, которое должно учитываться в диапазоне частот измерений. Если уровень звукового давления общего шума, включающего в себя шум машины и помех, превышает уровень помех на 10 дБ и более, то помехи можно не учитывать. В том случае, когда это превышение помех меньше 10 дБ, для учета помех необходимо из уровня звукового давления общего шума вычесть поправку. Так, например, если превышение составляет 9—6 дБ, то поправка равна 1 дБ, а если превышение составляет 5—4 дБ, то поправка — 2 дБ. Если уровень помех сильно колеблется или превышение помех меньше 4 дБ, то проведение измерений недопустимо.

Шумом помех следует считать также шум системы привода испытуемой машины и независимо действующих узлов и механизмов.

При измерении шума машина устанавливается таким образом, чтобы исключить погрешности в измерениях за счет передачи на нее посторонних вибраций, а также передачи вибрации от испытуемой машины к другим конструктивным элементам, которые могут стать источниками звуковых помех. С этой целью машину, независимо от способа ее установки в эксплуатации, необходимо при измерении шума подвешивать упруго или крепить к фундаменту на амортизаторах.

Допускается установка машины без амортизаторов, например подвеска машины. Установка без амортизаторов возможна лишь в том случае, когда известно, что для машин данного типа установка без амортизаторов не искажает шумовых характеристик.

Во избежание резонанса частота свободных колебаний f_0 (Гц) испытуемой машины, подвешенной или установленной на амортизаторах, должна удовлетворять условию $f_0 \leqslant 0{,}5 f_{мин}$, где $f_{мин}$ — наименьшая возможная частота вынужденных колебаний машины при испытании, Гц.

Для вращающихся машин при отсутствии автоколебаний $f_{мин} = n_{мин}/60$, где $n_{мин}$ — наименьшая частота вращения машины при испытании, об/мин.

Расчет частоты свободных колебаний f_0 производится по формуле (12.1).

При отсутствии данных о динамической жесткости амортизаторов приближенный расчет может производиться по формуле

$$f_0=0{,}5/\sqrt{\delta}, \qquad (12.2)$$

где δ — линейная деформация амортизатора или упругой подвески под действием массы изделия, м.

Если при измерении шумовых характеристик испытуемая машина должна быть спарена с каким-либо механизмом или устройством, то следует применять муфты, уменьшающие передачу вибрации по валу. При этом должны быть приняты меры, исключающие резонансные колебания.

Режим работы при испытании шумовых характеристик выбирается аналогично режиму работы при исследовании вибрационных характеристик. Измерения для определения шумовых характеристик машин должны проводиться шумомерами с полосовыми фильтрами или измерительным трактом, включающим в себя измерительный микрофон, усилитель, полосовые фильтры, индикаторный прибор, самописец уровня. Частотная характеристика измерительного тракта или шумомера должна удовлетворять значениям, приведенным в ГОСТ 17187—81. Частотная характеристика *Lin* или *C* шумомера используется для измерения уровней звукового давления, а характеристика *A* — для измерения уровня звука.

Измерительный микрофон должен иметь шаровую диаграмму направленности с отклонениями, не превышающими значений, указанных в ГОСТ 17187—81.

Ширина полосы пропускания фильтров шумомера или частотного анализатора должна быть равной одной октаве. Допускается применение приборов с шириной полосы пропускания, равной 1/3 октавы.

Калибровка приборов должна производиться до и после проведения измерений по соответствующим инструкциям.

При проведении измерений должны быть приняты меры, исключающие влияние внешних электромагнитных полей. Желательно применять конденсаторные микрофоны, как менее чувствительные к помехам, создаваемым электромагнитными полями.

Во время измерений корпус шумомера, другие приборы и наблюдатель должны находиться на расстоянии 1 м и более от микрофона. Показания шумомера следует брать с округлением до 1 дБ.

При наличии в испытательном помещении звукоотражающего пола (коэффициент звукопоглощения не более 0,05) испытуемую машину располагают на полу (на фундаменте) или непосредственно над полом вблизи его центра. Звукоотражающий пол должен простираться во все стороны за измерительную поверхность на величину измерительного расстояния и более. Если пол обладает хорошим звукопоглощением (коэффициент звукопоглощения не менее 0,8), то машину располагают над центром пола на высоте не менее 1 м от пола и не ближе 1,5 м от потолка.

Точки измерения при определении шумовых характеристик в условиях свободного поля выбираются в соответствии с рис. 12.3, *а, б*.

Расчет $l_{\text{макс}}$, $l_{\text{мин}}$ и d производят без учета выходного конца вала и других выступающих частей (деталей) машины. Расстояние от измерительной линии до поверхности испытываемой машины

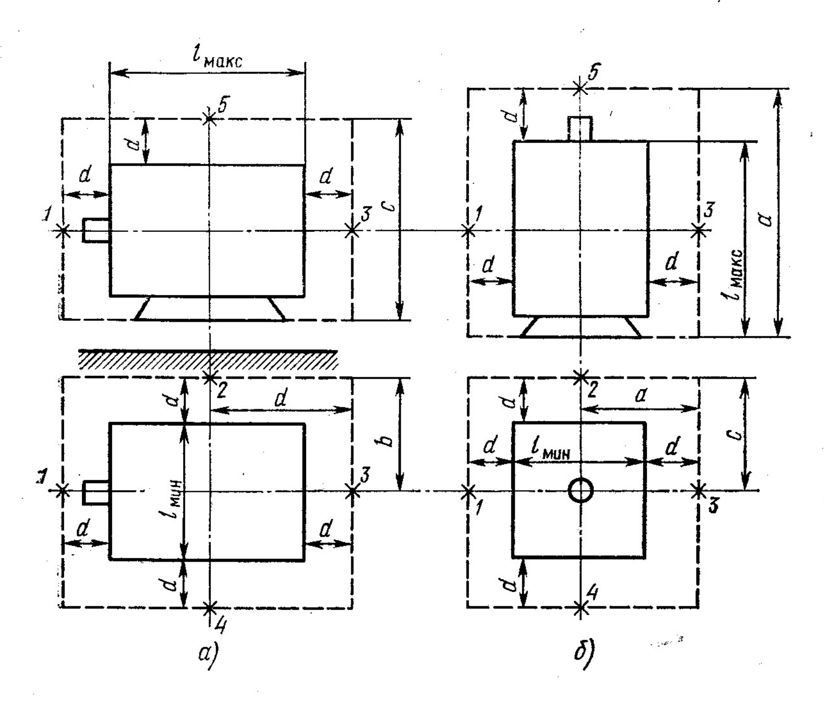


Рис. 12.3. Схема расположения точек измерения для машин горизонтального (*а*) и вертикального (*б*) исполнений

выбирается равным $d \geqslant 2l_{\text{макс}}$. При измерениях на расстоянии 1 м от наружного контура машины $d=1$ м. Для машин, имеющих $l_{\text{макс}} \leqslant 0{,}5$ м, допускается $d=0{,}5$ м с последующим пересчетом результатов измерений на измерительное расстояние 1 м по формуле

$$L_{A1}=(L_A)_{0,5}+20\lg r_1-10 \text{ дБ}\cdot\text{А}, \qquad (12.3)$$

где r_1 — эквивалентный радиус при $d=1$ м:

$$r_1=l_{\text{макс}}/2+d. \qquad (12.4)$$

Цель работы — ознакомление с методикой измерения вибрации и шума на примерах асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и однофазного коллекторного двигателя.

ПРОГРАММА РАБОТЫ

А. Экспериментальные исследования

1. Ознакомиться с конструкциями двигателей и их данными.

2. Ознакомиться с приборами для измерения вибрации и уровня звука.

3. Произвести калибровку приборов для измерения вибрации шума.

4. Измерить вибрации АД в режиме холостого хода: а) пустить в ход двигатель; б) измерить вибрации в измерительных точках; в) записать спектр вибрации (в одной из точек).

5. Определить составляющие магнитных вибраций двигателя: а) установить напряжение питания на 20—30% ниже $U_н$; б) измерить вибрации при пониженном напряжении; в) записать спектр вибрации в одной точке.

6. Измерить уровень шума однофазного коллекторного двигателя в режиме нагрузки: а) пустить в ход двигатель; б) установить номинальный режим нагрузки; в) измерить уровни звука в измерительных точках (шкала А); г) записать спектр шума в точке с наибольшим уровнем звука (линейная шкала).

7. Определить уровень магнитного шума: а) переключить двигатель с последовательного возбуждения на параллельное; б) установить номинальный ток и номинальную частоту вращения; г) измерить уровни шума в измерительных точках (шкала А); д) записать спектр шума в точке с наибольшим уровнем звука (линейная шкала).

8. Определить уровень звука механических источников: а) снять крыльчатку вентилятора; б) установить номинальную частоту вращения; в) измерить уровни звука в измерительных точках (шкала А); г) записать спектр шума в точке с наибольшим уровнем звука (линейная шкала).

Б. Расчеты и построения

1. Начертить структурную схему испытательной установки.

2. Рассчитать частоты вибровозмущающих сил и вибрации: а) механического происхождения; б) магнитного происхождения.

3. Рассчитать уровни шума двигателя на расстоянии 1 м от корпуса по результатам измерений п. 6б, 7г, 8в.

4. Проанализировать полученные спектры. Рассчитать частоты, соответствующие вентиляционному шуму, магнитному шуму и шуму коллектора. Определить уровни шума перечисленных источников.

ПОЯСНЕНИЯ И УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

Можно рассчитать частоты вибровозмущающих сил и вибрации АД, обусловленные наличием подшипников качения, по следующим формулам. Так, например, разностенность колец подшипников вызывает вибрации с частотой (Гц)

$$f_1 = n/60, \tag{12.5}$$

где n — частота вращения вала, об/мин.

Овальность внутренних колец является источником вибрации с двойной частотой вращения:

$$f_2 = 2n/60. \tag{12.6}$$

Смещение сепаратора, а следовательно, и его неуравновешенность вызывают вибрации с частотой вращения сепаратора

$$f_3 = (D_о - d_ш)\, n/(120 D_о), \tag{12.7}$$

где $D_о$ — диаметр окружности расположения центров тяжести тел качения; $d_ш$ — диаметр тел качения.

Отклонения в размерах тел качения и периодическое измерение жесткости подшипника при перекатывании шариков или роликов вызывает вибрации с частотой (Гц)

$$f_4 = (D_о - d_ш)\, nZ/(2D_о 60), \tag{12.8}$$

где Z — число тел качения.

Частота вибрации, обусловленной гранностью тел качения,

$$f_5 \approx (D_о^2 - d_ш^2)\, nkZ/(2D_о d_ш 60), \tag{12.9}$$

где $k = 0, 1, 2, \ldots, n$ — число граней на поверхности тела качения.

Дефекты рабочих поверхностей внутренних и внешних колец приводят к появлению вибрации с частотами соответственно

$$f_6 = (D_о^2 + d_ш^2)\, nZk_1'/(2D_о d_ш 60); \tag{12.10}$$

$$f_7 = (D_о^2 - d_ш^2)\, nZk_2'/(2D_о d_ш 60), \tag{12.11}$$

где k_1' и k_2' — число дефектов на рабочей поверхности внутреннего и внешнего колец.

Частотный спектр вибровозмущающих сил и вибраций, обусловленных магнитными причинами, может быть получен расчетным путем. Так, например,

$$f_8 = f_0 \left(k_2 \frac{Z_2}{p} + \begin{matrix} 2 \\ 0 \end{matrix} \right), \tag{12.12}$$

где f_0 — частота питающей сети, Гц; $k_2 = 0;\ \pm 1;\ \pm 2;\ \pm 3;\ \ldots;\ Z_2$ — число пазов ротора; p — число пар полюсов.

Частоты вибровозмущающих сил, обусловленных эксцентриситетом и насыщением, можно получить по соответствующим выражениям

$$f_э = f_0 \left(k_2 \frac{Z_2}{p} \pm \frac{1}{p} + \begin{matrix} 2 \\ 0 \end{matrix} \right); \tag{12.13}$$

$$f_н = f_0 \left(k_2 Z_2/p + \begin{matrix} 4 \\ 2 \end{matrix} \right). \tag{12.14}$$

Расчетные значения частот вибрации магнитного и механического происхождений необходимо отметить на экспериментальных виброграммах, полученных в соответствии с п. 4в, 5в, и сопоставить результаты расчета и эксперимента.

В качестве нормируемого значения уровня звука принимаем согласно ГОСТу средний уровень звука, обозначаемый L_{1A}, на расстоянии 1 м от контура машины при наличии звукоотражающего пола, или корректированный уровень звуковой мощности, обозначаемый L_{pA}.

Средний уровень звука

$$L_A = 10 \lg \left(\sum_{1}^{n} 10^{0,1L_i} \right) - 10 \lg n, \qquad (12.15)$$

где L_i — уровень звука в i-й точке измерения; $i = 1, 2, 3, \dots$; n — число точек измерения.

Если усредняемые уровни звукового давления отличаются друг от друга меньше чем на 5 дБ, то за средний уровень шума принимается среднее арифметическое этих уровней.

Вопросы для самопроверки

1. Перечислите источники и причины возникновения вибрации и шума.
2. Назовите магнитные источники вибрации и шума.
3. Назовите механические источники вибрации и шума.
4. Перечислите аэродинамические источники вибрации и шума.
5. Расскажите о способах определения вибрации и уровня звука.
6. От каких факторов зависит точность измерения вибрации и шума?
7. Какие основные приборы входят в комплект измерения вибрации и шума?
8. Как определить составляющие вибрации и шума механического, магнитного и аэродинамического происхождений?
9. Что такое вибрационные смещения, скорость и ускорение?
10. Как выражаются вибрационные скорость и ускорение в децибелах?
11. Какие режимы работы электрической машины допускаются при ее виброакустических испытаниях?
12. Объясните принцип действия вибропреобразователя.

§ 12.2. ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИОПОМЕХ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Индустриальные радиопомехи — это электромагнитные помехи, которые создаются электрическими и электронными устройствами и оказывают мешающее действие радиоприему.

Принципиально радиопомехи от электрических машин могут распространяться двумя путями: электромагнитным излучением, по проводам, отходящим от электрических машин.

В результате электромагнитного излучения создается электромагнитное поле радиопомех, которое воздействует на антенны теле- и радиоприемников, создавая неустойчивый прием теле- и радиопередач.

На рис. 12.4 изображена емкостная связь антенны приемника с помехонесущей сетью. В этом случае преобладает емкостная связь между антенной приемника и помехонесущей сетью вследствие параллельности проводов антенны и сети, однако даже и в этом случае существует также и индуктивная связь между сетью и антенной. Наиболее эффективное индуктивное воздействие помехоне-

сущей сети на антенну будет в том случае, если антенна приемника — рамочного типа; емкостная связь тогда минимальна.

Поле помех наиболее эффективно воздействует на антенны в том случае, когда помехонесущие провода находятся в непосредственной близости от антенн приемников. При достаточном удалении помехонесущих проводов поле помех естественным образом быстро затухает и его влияние на антенны ослабевает.

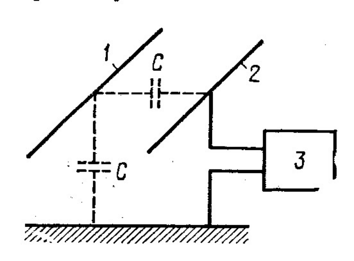


Рис. 12.4. Схема емкостной связи антенны приемника с помехонесущей сетью:

1 — провод помехонесущий; 2 — антенна приемника; 3 — приемник

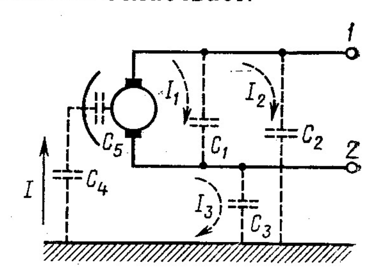


Рис. 12.5. Картина расположения распределительных емкостей между электрической машиной и «землей»

В результате распространения радиопомех по проводам, отходящим от источника помех, возникает напряжение помех, которое, распространяясь по проводам, попадает в приемные устройства.

Напряжение помех — это высокочастотный, чаще всего непрерывный спектр напряжений, амплитуда которых с ростом частоты уменьшается. Если рассматривать спектр напряжения помех от одного источника, то математически его можно представить в виде ряда

$$U = U_1 \sin(\omega t + \psi_1) + U_2 \sin(2\omega t + \psi_2) + \ldots + U_n \sin(n\omega t + \psi_n), \quad (12.16)$$

где $\omega = 2\pi f$.

Как показали многие опыты, амплитуды напряжений с ростом частоты убывают по гиперболическому закону. Амплитуду напряжения, соответствующую какой-либо частоте, можно определить из выражения

$$U_n = A/f_n,$$

где $A = \text{const}$.

Напряжение помех в электрических машинах создается высокочастотными токами, протекающими через электрическую машину. В общем случае напряжения помех в электрической машине возникают всегда, когда имеются изменения во времени либо тока, либо потока, либо сопротивления цепи, т. е. когда

$$di/dt \neq 0; \; d\Phi/dt \neq 0; \; dR/dt \neq 0; \; dU/dt \neq 0.$$

На рис. 12.5 изображены два пути распространения напряжений помех.

По первому пути распространяются помехи, создаваемые высокочастотными токами, проходящими от источника по проводу *1* через распределенную емкость C_1 между проводами и далее по проводу *2* к источнику. Так как токи, создающие симметричные помехи, текут по обоим проводам, но в разные стороны, то образующиеся вокруг проводов электромагнитные поля в каждое мгновение будут иметь противоположные знаки при равных амплитудах. Поэтому их результирующее внешнее воздействие будет мало.

По второму пути распространяются помехи, вызываемые высокочастотными токами, проходящими по проводам *1* и *2* через распределенные емкости C_2 и C_3 на землю и возвращающиеся через распределенную емкость C_4 на корпус и через C_5 к источнику.

Несимметричные составляющие напряжений помех обусловливаются именно наличием емкостей между обмотками якоря и полюсов, с одной стороны, и корпусом машины — с другой. Эти емкости в значительной степени определяют напряжения несимметричных радиопомех в электрической сети. Несимметричные напряжения помех кроме непосредственного распространения по электрическим сетям воздействуют еще и суммарным электромагнитным полем помех. Именно несимметричные напряжения помех оказывают основное мешающее воздействие на теле- и радиоприем. Поэтому в дальнейшем под мешающим воздействием будут пониматься именно несимметричные помехи, называемые радиопомехами.

Среди многочисленного класса электрических машин наибольший уровень радиопомех создают электрические машины, имеющие в своей конструкции коллектор, хотя, безусловно, источниками радиопомех (как напряжений помех, так и электромагнитных полей) являются практически все виды электрических машин.

Здесь же будут рассмотрены только коллекторные электрические машины, как наиболее «вредные» с точки зрения радиопомех.

Анализ многочисленной литературы, как отечественной, так и зарубежной, позволяет считать, что в коллекторной машине имеется ряд факторов, которые создают свой спектр радиопомех или влияют на общий уровень радиопомех. Все эти спектры, накладываясь друг на друга в отходящих от машины проводах (именно там происходит слияние всех высокочастотных токов и напряжений), образуют сплошной спектр радиопомех. Анализ позволяет сгруппировать все основные факторы, участвующие в образовании радиопомех, в три основные группы: 1) электромагнитные; 2) механические; 3) физико-химические.

К первой группе факторов относятся: изменение питаемого напряжения; пульсации магнитного потока в воздушном зазоре (воздействие потока реакции якоря на обмотки главных и добавочных полюсов); коммутация секций обмотки якоря (наличие высокочастотных коммутационных токов и потоков); различные пульсации ЭДС в обмотке якоря и коммутируемой секции.

Ко второй группе факторов относятся: динамическая неуравновешенность вращающихся частей; эксцентриситет поверхности скольжения щеток относительно оси вращения; волнистость поверх-

ности скольжения коллектора; выступание или западание отдельной ламели; наличие трения между щеткой и коллектором; воздействие внешних возмущающих факторов вибрационного характера.

К третьей группе факторов относятся: передача тока между подвижными контактами при наличии оксидной пленки; изменение переходного сопротивления между щеткой и коллектором; полупроводниковые свойства медно-закисной пленки; химические процессы, проходящие между щеткой и коллектором, а также на поверхности коллектора.

Факторы, относящиеся к первой группе, влияют на создание в электрических машинах изменяющихся во времени высокочастотных магнитных потоков и изменяющихся во времени высокочастотных ЭДС.

Факторы, относящиеся ко второй группе, оказывают воздействие на скользящий контакт щетка — коллектор. В результате воздействия этих факторов происходит неупорядоченное нарушение механического контакта щетка — коллектор, что приводит к модуляции переходного сопротивления щетка — коллектор.

Кроме того, нарушение механического контакта между щеткой и ламелью приводит к изменению переходного падения напряжения ΔU между щеткой и ламелью.

Факторы, относящиеся к третьей группе, обусловлены физико-химическими процессами, происходящими на поверхности коллектора и в пространстве между коллектором и щеткой.

Цель работы — ознакомление с методикой измерения радиопомех.

ПРОГРАММА РАБОТЫ

А. Экспериментальные исследования

1. Ознакомиться с конструкцией однофазного коллекторного двигателя переменного тока.
2. Определить число коллекторных пластин в коллекторе и снять статическую профилограмму коллектора.
3. Измерить уровень напряжений радиопомех в диапазоне от 0,15 до 30 МГц при отсутствии фильтра и номинальном режиме работы двигателя.
4. Измерить уровень напряжений радиопомех в диапазоне от 0,15 до 30 МГц при включении фильтра и номинальном режиме работы двигателя.

Б. Расчеты и построения

1. Рассчитать основные несущие частоты напряжений радиопомех: а) зубцовую; б) ламельную.
2. Построить на одном графике спектры напряжений радиопомех, полученных без фильтра и с помехоподавляющим фильтром.
3. Построить статическую профилограмму коллектора универсального коллекторного электродвигателя.
4. Определить эффективность затухания напряжений радиопомех при наличии помехоподавляющего фильтра.

ПОЯСНЕНИЯ И УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

Прежде чем приступить к выполнению экспериментальной части работы, необходимо записать в протокол паспортные данные двигателя, число зубцов якоря и ламелей коллектора; нарисовать принципиальную схему для измерения напряжения радиопомех и рассчитать зубцовую и ламельную несущие частоты при номинальной частоте вращения

$$f_z = z n_{\text{ном}}/60; \quad f_{\text{л}} = N_{\text{л}} n_{\text{ном}}/60, \tag{12.17}$$

где z — число зубцов якоря; $N_{\text{л}}$ — число ламелей коллектора; $n_{\text{ном}}$ — номинальная частота вращения.

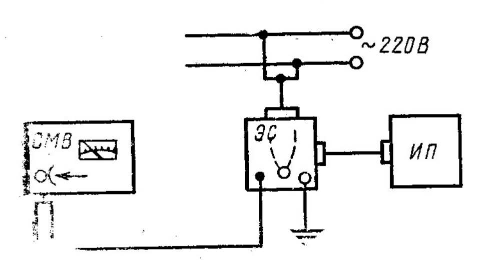


Рис. 12.6. Структурная схема для измерения напряжений помех

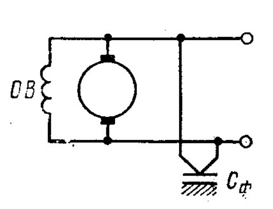


Рис. 12.7. Схема фильтра — «емкостная блокировка»

Принципиальная схема для измерения напряжения радиопомех изображена на рис. 12.6. Перед началом измерения необходимо откалибровать селективный микровольтметр *СМВ*. Для непосредственного измерения напряжений на выводах электродвигателя применяются пробники.

Статическая профилограмма коллектора. Она снимается при вынутом из двигателя якоре. Якорь устанавливается на подставку и к нему подводится стойка, на которой крепится микрометр с щупом. Щуп микрометра устанавливают посередине коллектора на одну из ламелей и записывают показание шкалы микрометра. Затем якорь рукой поворачивают на одно коллекторное деление, чтобы щуп микрометра оказался на соседней ламели, и снова записывают показания шкалы. Таким образом, провернув якорь на 360°, заносят в таблицу относительный перепад радиальной высоты коллекторных пластин. Затем по полученным данным строят профилограмму коллектора.

Уровень напряжений радиопомех. Источник радиопомех *ИП* (электродвигатель) включают через эквивалент сети *ЭС*, который отфильтровывает высокочастотный спектр питающего напряжения. Затем измеряют напряжения радиопомех на фиксированных частотах, включая и рассчитанные зубцовую и ламельную частоты. Напряжение помех измеряется на обоих выводах электродвигателя.

Перед измерением напряжений помех к выводам подсоединяют проходной конденсатор $C_{\text{ф}}$ (рис. 12.7). Затем проводят измерение как в п. 3.

На практике часто напряжения радиопомех от коллекторных электродвигателей превышают допустимые нормы. Для уменьшения уровня радиопомех от этих двигателей ставят различные помехоподавляющие фильтры. Простейший фильтр, который используется для подавления радиопомех, — это конденсатор, включенный по схеме, представленной на рис. 12.7.

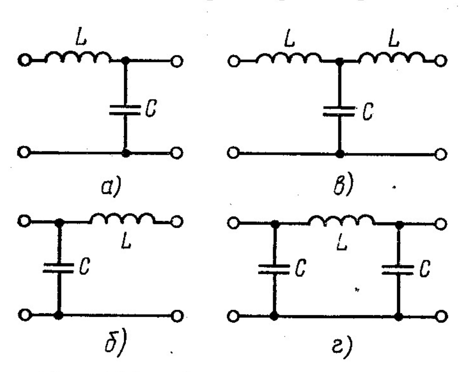


Рис. 12.8. Схемы различных типов помехоподавляющих фильтров

При больших превышениях над допустимыми нормами могут использоваться и более сложные фильтры — Г-, П- и Т-образные фильтры. Примеры таких фильтров показаны на рис. 12.8, *а—г*.

В каждом конкретном случае при расчете помехоподавляющих фильтров необходимо знать внутреннее комплексное сопротивление электродвигателя. Ориентировочный расчет фильтров производится по специальной методике. Затем рассчитанный фильтр проверяется в изделии и дорабатывается путем опытного подбора элементов.

Недостатком применения помехоподавляющих фильтров является то, что фильтрация напряжений помех происходит не во всем диапазоне частот, а только на определенных частотах, на которые рассчитывается фильтр.

Кроме фильтров для подавления или снижения уровня напряжения радиопомех применяют различные конструктивные и технологические мероприятия, улучшающие качество изготовления подшипниковых и щеточно-коллекторного узлов, позволяющие выбрать рациональные обмотки якоря, и др.

Вопросы для самопроверки

1. В каких единицах выражается уровень напряжения и поля помех?
2. Какие существуют пути распространения радиопомех от электрических машин?
3. Каким образом воздействует поле помех на теле- и радиоприем?
4. Какие токи — симметричные или несимметричные — представляют наибольший «вред» с точки зрения напряжений помех и почему?
5. Какие несущие частоты имеются в спектре напряжений помех?
6. По каким группам можно разбить все факторы, участвующие в образовании радиопомех?
7. Перечислите факторы, относящиеся к той или иной группе.
8. Каковы общие условия образования радиопомех?
9. Какие существуют способы борьбы с радиопомехами?
10. Какие типы помехоподавляющих фильтров Вы знаете?

Раздел пятый

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МИКРОМАШИН НА АВМ

Глава 13

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ МИКРОМАШИН НА АВМ

Электрические микромашины сравнительно часто работают в переходных режимах. В общем случае переходные процессы в электрических машинах описываются системой нелинейных дифференциальных уравнений, аналитическое решение которых возможно лишь при существенных допущениях. Наиболее просто и наглядно переходные процессы в электромеханических системах исследуются на аналоговых вычислительных машинах (АВМ) [15].

В АВМ используется метод математического моделирования, характеризующийся тем, что модель и оригинал, различные по своей физической сущности, описываются одинаковыми по форме уравнениями. Аналоговые вычислительные машины состоят из решающих блоков, выполняющих операции интегрирования, суммирования, умножения, перемены знака функции и т. д. Символическое обозначение основных решающих блоков приведено в табл. 13.1. Почти все решающие блоки в АВМ построены на базе операционных усилителей постоянного тока, поэтому характерной особенностью АВМ является смена знака у выходной величины решающего блока. Описание устройства и технических характеристик различных типов АВМ можно найти в специальной литературе [4, 16].

Методика постановки задачи на АВМ включает в себя следующие этапы: 1) преобразование дифференциальных уравнений к виду, удобному для реализации на АВМ; 2) составление схемы моделирования в соответствии с преобразованной системой уравнений; 3) выбор масштабов переменных величин, входящих в уравнения, и расчет коэффициентов передач решающих блоков модели; 4) расчет таблиц настройки нелинейных блоков; 5) набор математической модели на АВМ; 6) фиксация решения.

Преобразование уравнений. Для электрических машин преобразование исходных уравнений к виду, удобному для моделирования, состоит, как правило, в решении их относительно высшей производной. Например, если при начальных условиях $(d^2x/dt^2)_0=0$, $(dx/dt)_0=c_1$, $x_0=c_2$ исходное уравнение имеет вид

$$b_1 d^2x/dt^2 + b_2 dx/dt + b_3 x = 0, \quad (13.1)$$

Таблица 13.1

Назначение решающего блока	Обозначение решающего блока	Математическое описание работы блока
Масштабный блок (при $k=1$ — инвертор)	$U_{вх}$ k_{i1} i	$U_{вых} = -k_{i1}U_{вх}$
Сумматор	$U_{вх1}$ k_{i1} $U_{вх2}$ k_{i2} i $U_{вых}$	$U_{вых} = -\sum k_{ij}U_{вх\,j}$
Интегратор	U_0 $U_{вх}$ k_{i1} i $U_{вых}$	$U_{вых} = -k_{i1}\int_0^t U_{вх}dt \pm U_0$
Интегросумматор	$U_{вх1}$ k_{i1} U_0 $U_{вх2}$ k_{i2} i $U_{вых}$	$U_{вых} = -\sum k_{ij}\int_0^t U_{вх\,j} \pm U_0$
Блок произведения	$U_{вх1}$ $\times i$ $U_{вх2}$ $U_{вых}$	$U_{вых} = 0{,}01U_{вх1}U_{вх2}$
Функциональный (нелинейный) блок	$U_{вх}$ $f(x)$ $U_{вых}$	$U_{вых} = f(U_{вх})$

то преобразованное уравнение при неизменных начальных условиях запишется как

$$d^2x/dt^2 = -a_1dx/dt - a_2x, \qquad (13.2)$$

где $a_1 = b_2/b_1$; $a_2 = b_3/b_1$.

Составление схемы моделирования. Схема набора модели на АВМ составляется по методу понижения порядка производной путем подачи ее на вход интегратора. Схема, моделирующая уравнение (13.2), приведена на рис. 13.1, из которой видно, что для реализации (13.2) необходимы интегросумматор, интегратор и инвертор. При составлении схемы моделирования нужно стремиться к тому, чтобы обратными связями охватывалось нечетное число операционных усилителей. В этом случае модель получается более устойчивой.

Выбор масштабов и расчет коэффициентов. В АВМ в качестве машинной переменной используется напряжение постоянного тока. Связь между переменными величинами модели и исследуемого урав-

нения устанавливается с помощью масштабных коэффициентов по формуле

$$x_м = m_x x_р, \qquad (13.3)$$

где $x_м$ — машинная переменная; m_x — масштаб; $x_р$ — реальная переменная в преобразованном уравнении. Обычно масштабы выбираются исходя из оценки максимальных значений реальных переменных и известного рабочего диапазона АВМ.

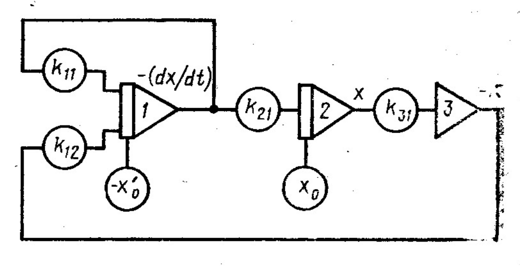


Рис. 13.1. Схема моделирования уравнения (13.2)

В дальнейшем принимается, что рабочий диапазон решающих блоков равен ±100 В. Поэтому масштаб одной переменной рассчитывается из условия

$$m_x = 100/x_{р.макс}; \qquad (13.4)$$

масштабы суммы и произведения двух переменных — из условий

$$m_\Sigma = 100/(x_р + y_р)_{макс}; \qquad (13.5)$$

$$m_{xy} = 0{,}01 m_x m_y. \qquad (13.6)$$

Максимальные значения переменных обычно приближенно известны из физического смысла задачи. Так, известно, например, что при пуске трехфазного асинхронного двигателя кратность пускового тока может достигать 5—7, а кратность пускового электромагнитного момента — 3—4.

Независимой переменной величиной АВМ является машинное время, масштаб его определяется соотношением

$$m_t = t_м/t_р, \qquad (13.7)$$

где $t_м$ и $t_р$ — машинная и реальная независимые переменные.

Масштаб времени выбирается из условий необходимости замедления или ускорения исследуемого переходного процесса, возможности его регистрации и воспроизводимости на используемой АВМ. При $m_t > 1$ переходный процесс на модели замедляется в m_t раз.

По выбранным масштабам и известным коэффициентам при переменных в преобразованных уравнениях рассчитываются коэффициенты передач k_{ij} решающих блоков:

для суммирующего (масштабного) блока

$$k_{ij} = a_j m_{вых}/m_{вх}, \qquad (13.8)$$

где i — номер решающего блока; j — номер входа решающего блока; a_j — коэффициент в преобразованном уравнении, стоящий перед переменной, поступающей на вход решающего блока; $m_{вых}$ и $m_{вх}$ — масштабы выходной и входной переменных величин;

для интегрирующего блока

$$k_{ij}=a_j m_{\text{вых}}/(m_{\text{вх}} m_t); \qquad (13.9)$$

для суммирующего блока, на вход которого подается произведение двух величин,

$$k_{ij}=100 a_j m_{\text{вых}}/(m_{\text{вх}\,x} m_{\text{вх}\,y}); \qquad (13.10)$$

для интегрирующего блока, на вход которого поступает произведение двух величин,

$$k_{ij}=100 a_j m_{\text{вых}}/(m_{\text{вх}\,x} m_{\text{вх}\,y} m_t). \qquad (13.11)$$

Для схемы набора модели уравнения (13.2) коэффициенты передач рассчитываются по формулам (13.8), (13.9):

$$k_{11}=a_1/m_t; \quad k_{12}=a_2 m_{x'}/(m_x m_t); \quad k_{21}=m_x/(m_{x'} m_t), \quad k_{31}=1.$$

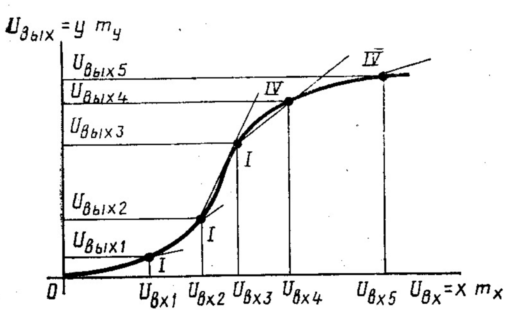


Рис. 13.2. Кривая, аппроксимирующая нелинейную зависимость

Обычно АВМ позволяют устанавливать коэффициенты передач решающих блоков в пределах $0{,}01 \leqslant k_{ij} \leqslant 10$. Настройка этих коэффициентов производится на масштабном блоке, выход которого подается на вольтметр, а на вход подключается входное переменное сопротивление (при $k_{ij}<1$ значение $R_{\text{вх}\,j} \neq 1$ МОм, при $k_{ij}>1$ значение $R_{\text{вх}\,j} \neq 0{,}1$ МОм). На входное сопротивление подается эталонное напряжение (100 В при $k_{ij}<1$ и 10 В при $k_{ij}>1$) и изменением величины $R_{\text{вх}\,j}$ устанавливается требуемое напряжение на выходе решающего блока. Отношение выходного напряжения к входному определяет значение коэффициента передачи. Перед началом настройки коэффициентов должны быть проверены и установлены нули решающих блоков так, чтобы при отсутствии сигнала на входе усилителя на его выходе был нулевой потенциал.

Дифференциальные уравнения электрических машин могут содержать различного рода нелинейности. Нелинейная операция перемножения переменных величин реализуется на АВМ блоком произведения, а функциональная зависимость воспроизводится функциональным блоком приближенно — методом линейно-кусочной аппроксимации. Основным элементом функционального блока является диодная ячейка, воспроизводящая в любом, но в одном, квадранте функцию

$$y=\pm k(x-x_{\text{нач}}), \qquad (13.12)$$

где $k=0$ при $|x| \leqslant |x_{\text{нач}}|$ и $k=\text{const}$ при $|x|>|x_{\text{нач}}|$.

Совокупность нескольких диодных ячеек позволяет воспроизводить любую линейно-кусочную монотонную функцию. Рассмотрим однозначную непрерывную на определенном интервале нелинейную зависимость $y=f(x)$, представленную с учетом масштабов переменных на рис. 13.2. Используя метод линейно-кусочной аппроксимации, эту зависимость можно представить выражением

$$ym_y=\sum_{i=1}^{i=5} k_i(x-x_{\text{нач}\,i})\,m_x, \qquad (13.13)$$

где k_i — коэффициент, определяющий крутизну характеристики диодной ячейки; $x_{\text{нач}\,i}$ — значение x в начале каждого отрезка разбиения аргумента; i — номер отрезка.

Точность аппроксимации заданной функции определяется числом отрезков ломаной линии. Принадлежность диодной ячейки к тому или иному квадранту определяется положением последующего отрезка разбиения по отношению к предыдущему (на рис. 13.2 квадранты отмечены римскими цифрами). По выражению (13.13) и аппроксимирующей кривой (рис. 13.2) составляется карта настройки нелинейного блока, приведенная в табл. 13.2. Ограничением по x (установкой отпирающего напряжения $U_{\text{отп}}$) осуществляется включение необходимой диодной ячейки, а настройкой $f(x)$ устанавливается требуемая крутизна характеристики диодной ячейки ($k_i=U_{\text{вых}i}/U_{\text{вх}i}$).

Таблица 13.2

Квадранты		I		I		IV	
Диоды		1	2	3	4	5	6
Ограничение по x ($U_{\text{отп}}$)		0	$U_{\text{вх}1}$		$U_{\text{вх}2}$	$U_{\text{вх}3}$	$U_{\text{вх}4}$
Настройка $f(x)$	$U_{\text{вх}}$	$U_{\text{вх}1}$	$U_{\text{вх}2}$		$U_{\text{вх}3}$	$U_{\text{вх}4}$	$U_{\text{вх}5}$
	$U_{\text{вых}}$	$U_{\text{вых}1}$	$U_{\text{вых}2}$		$U_{\text{вых}3}$	$U_{\text{вых}4}$	$U_{\text{вых}5}$

Набор модели. После настройки коэффициентов передач и нелинейных блоков производится коммутация решающих блоков согласно составленной схеме набора модели. На интегрирующих блоках путем зарядки конденсаторов устанавливаются начальные условия, выраженные в масштабе выходных переменных. Для схемы моделирования, представленной на рис. 13.1,

$$-(dx/dt)_0=-m_{x'}c_1;\ x_0=m_xc_2.$$

После набора задачи на АВМ осуществляется пробное решение, позволяющее уточнить масштабы переменных величин. При этом необходимо следить за тем, чтобы решающие блоки не выходили за пределы линейности, т. е. чтобы их выходное напряжение не превышало ±100 В.

При использовании малых АВМ с недостаточным числом ре-

шающих блоков допускается параллельная работа нескольких моделирующих установок. В этом случае АВМ, с которой ведется управление, является ведущей, а остальные АВМ — ведомыми.

Фиксация решения. Система управления АВМ позволяет многократно воспроизводить процесс решения задачи (кнопки «Пуск» и «Исходное положение») и останавливать исследуемый процесс в желаемые моменты времени (кнопка «Останов»). В связи с этим решение может фиксироваться визуально на экране осциллографа, непрерывно с помощью записывающих регистраторов (двухкоординатных самописцев) и измерением дискретных значений цифровыми измерительными приборами.

В практике исследования электрических машин на АВМ широко используется система относительных единиц. При этом в качестве базисных величин принимаются:

$U_б = \sqrt{2} U_{н.ф}$ — амплитуда номинального фазного напряжения, В;

$I_б = \sqrt{2} I_{н.ф}$ — амплитуда номинального фазного тока, А;

$Z_б = U_б / I_б = U_{н.ф} / I_{н.ф}$ — входное сопротивление, Ом;

$P_б = m_1 U_б I_б / 2 = m_1 U_{н.ф} I_{н.ф}$ — мощность, Вт (m_1 — число фаз);

$\omega_б = \omega_c = 2\pi f_1$ — синхронная электрическая угловая скорость, рад/с;

$t_б = 1/\omega_б = 1/2\pi f_1$ — время, с;

$\Psi_б = U_б t_б = \sqrt{2} U_{н.ф} / (2\pi f_1)$ — потокосцепление, В·с;

$L_б = Z_б / \omega_б = (U_{н.ф} / I_{н.ф}) / (2\pi f_1)$ — индуктивность, Гн;

$M_б = p P_б / \omega_б = p m_1 U_{н.ф} I_{н.ф} / (2\pi f_1)$ — момент, Н·м (p — число пар полюсов);

$J_б = p M_б t_б / \omega_б$ — момент инерции, кг·м^2.

При использовании системы относительных единиц физический смысл уравнений электрических машин сохраняется, но время протекания электромеханических переходных процессов при моделировании возрастает в $\omega_б$ раз. Это замедление необходимо учитывать при выборе масштаба машинного времени.

Выбор в качестве базисной угловой скорости синхронной электрической угловой скорости позволяет заменить в уравнениях электрических машин относительные индуктивности численно равными относительными индуктивными сопротивлениями ($L/L_б = x/x_б$).

Параметры электрических машин при моделировании на АВМ — величины заданные. Они должны быть заранее определены либо расчетным, либо опытным путем. В дальнейшем все уравнения электрических машин записываются в относительных единицах. Использование абсолютных единиц будет специально оговариваться.

Вопросы для самопроверки

1. Перечислите этапы постановки задачи на АВМ.
2. Как составляется схема набора модели на АВМ?
3. Из каких условий выбираются масштабы переменных?
4. Как рассчитываются коэффициенты передач решающих блоков и как осуществляется их настройка?
5. Как воспроизводится на АВМ нелинейная зависимость?
6. Как устанавливаются начальные условия?

Глава 14

ИССЛЕДОВАНИЕ НА АВМ АСИНХРОННЫХ МИКРОДВИГАТЕЛЕЙ

§ 14.1. АСИНХРОННЫЙ ТРЕХФАЗНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Для исследования динамических режимов асинхронных двигателей наиболее часто используются дифференциальные уравнения асинхронной машины, выраженные в системе ортогональных координат α, β, неподвижных относительно статора [4, 15]. При общепринятых в теории асинхронных машин допущениях дифференциальные уравнения напряжений симметричного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в относительных единицах записываются в следующем виде:

$$\left.\begin{aligned} u_{\alpha S}&=r_S i_{\alpha S}+d\psi_{\alpha S}/dt;\\ u_{\beta S}&=r_S i_{\beta S}+d\psi_{\beta S}/dt;\\ 0&=r_R i_{\alpha R}+d\psi_{\alpha R}/dt+\omega_R\psi_{\beta R};\\ 0&=r_R i_{\beta R}+d\psi_{\beta R}/dt-\omega_R\psi_{\alpha R},\end{aligned}\right\} \qquad (14.1)$$

где напряжения питания

$$u_{\alpha S}=\cos(t+\gamma_0);\ u_{\beta S}=\sin(t+\gamma_0), \qquad (14.2)$$

потокосцепления обмоток статора и ротора

$$\left.\begin{aligned} \psi_{\alpha S}&=x_S i_{\alpha S}+x_m i_{\alpha R};\ \psi_{\alpha R}=x_R i_{\alpha R}+x_m i_{\alpha S};\\ \psi_{\beta S}&=x_S i_{\beta S}+x_m i_{\beta R};\ \psi_{\beta R}=x_R i_{\beta R}+x_m i_{\beta S}.\end{aligned}\right\} \qquad (14.3)$$

Здесь индуктивные сопротивления фаз обмоток статора и ротора

$$x_S=x_{\sigma S}+x_m;\ x_R=x_{\sigma R}+x_m,$$

где r_S, $x_{\sigma S}$ — активное сопротивление и индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки статора; r_R, $x_{\sigma R}$ — активное сопротивление и индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, приведенные к числу витков и числу фаз обмотки статора; x_m — сопротивление взаимной индуктивности.

Все указанные параметры тождественны сопротивлениям, входящим в схему замещения асинхронной машины для установившегося режима, и выражены в относительных единицах. Выражения для базисных величин приведены в гл. 13.

Если ротор двигателя вращается с переменной угловой скоростью, то его движение описывается уравнением

$$J d\omega_R/dt+M_{\text{нагр}}=M_э, \qquad (14.4)$$

где J — относительное значение момента инерции ротора и приведенного момента инерции нагрузочного механизма; ω_R — электрическая угловая скорость ротора, отн. ед.; t — относительное время;

$M_{нагр}$ — момент внешних сил, отн. ед.; $M_э$ — электромагнитный момент двигателя, отн. ед.:

$$M_э=\psi_{\beta S} i_{\alpha S}-\psi_{\alpha S} i_{\beta S}. \qquad (14.5)$$

Уравнения (14.1)—(14.5) описывают электромеханические процессы в асинхронном двигателе. Для построения аналоговой модели наиболее удобны уравнения, в которых искомыми переменными являются потокосцепления. В этом случае модель требует минимального числа решающих элементов и получается устойчивой.

Чтобы исключить токи, выразим их через потокосцепления, используя уравнения (14.3):

$$\left.\begin{aligned} i_{\alpha S}&=\frac{x_R\psi_{\alpha S}-x_m\psi_{\alpha R}}{x_S x_R-x_m^2}; \quad i_{\alpha R}=\frac{x_S\psi_{\alpha R}-x_m\psi_{\alpha S}}{x_S x_R-x_m^2};\\ i_{\beta S}&=\frac{x_R\psi_{\beta S}-x_m\psi_{\beta R}}{x_S x_R-x_m^2}; \quad i_{\beta R}=\frac{x_S\psi_{\beta R}-x_m\psi_{\beta S}}{x_S x_R-x_m^2}. \end{aligned}\right\} \qquad (14.6)$$

Тогда система уравнений, преобразованная к виду, удобному для моделирования, запишется как

$$\left.\begin{aligned} &d\psi_{\alpha S}/dt=\cos(t+\gamma_0)-a_1\psi_{\alpha S}+a_2\psi_{\alpha R};\\ &d\psi_{\beta S}/dt=\sin(t+\gamma_0)-a_1\psi_{\beta S}+a_2\psi_{\beta R};\\ &d\psi_{\alpha R}/dt=a_3\psi_{\alpha S}-a_4\psi_{\alpha R}-\omega_R\psi_{\beta R};\\ &d\psi_{\beta R}/dt=a_3\psi_{\beta S}-a_4\psi_{\beta R}+\omega_R\psi_{\alpha R};\\ &d\omega_R/dt=a_5(M_э-M_{нагр});\\ &M_э=a_6(\psi_{\beta S}\psi_{\alpha R}-\psi_{\alpha S}\psi_{\beta R}). \end{aligned}\right\} \qquad (14.7)$$

Здесь коэффициенты при переменных

$$\left.\begin{aligned} &a_1=r_S x_R/(x_S x_R-x_m^2); \quad a_2=r_S x_m/(x_S x_R-x_m^2);\\ &a_3=r_R x_m/(x_S x_R-x_m^2); \quad a_4=r_R x_S/(x_S x_R-x_m^2);\\ &a_5=1/J; \quad a_6=x_m/(x_S x_R-x_m^2). \end{aligned}\right\} \qquad (14.8)$$

В преобразованной системе уравнений (14.7) токи в явном виде отсутствуют, однако при необходимости они могут быть определены из алгебраических уравнений (14.6).

На основании системы дифференциальных уравнений (14.7) составляется схема набора модели асинхронного двигателя (рис. 14.1, *а*), которая содержит четыре блока произведения БП, пять интегросумматоров, один сумматор и шесть инверторов. При необходимости определения токов статора и ротора схема должна быть дополнена еще четырьмя сумматорами (рис. 14.1, *б*), реализующими уравнения

$$\left.\begin{aligned} &i_{\alpha S}=a_7\psi_{\alpha S}-a_6\psi_{\alpha R}; \quad i_{\alpha R}=a_8\psi_{\alpha R}-a_6\psi_{\alpha S};\\ &i_{\beta S}=a_7\psi_{\beta S}-a_6\psi_{\beta R}; \quad i_{\beta R}=a_8\psi_{\beta R}-a_6\psi_{\beta S}, \end{aligned}\right\} \qquad (14.9)$$

где

$$a_7 = x_R/(x_S x_R - x_m^2); \quad a_8 = x_S/(x_S x_R - x_m^2). \qquad (14.10)$$

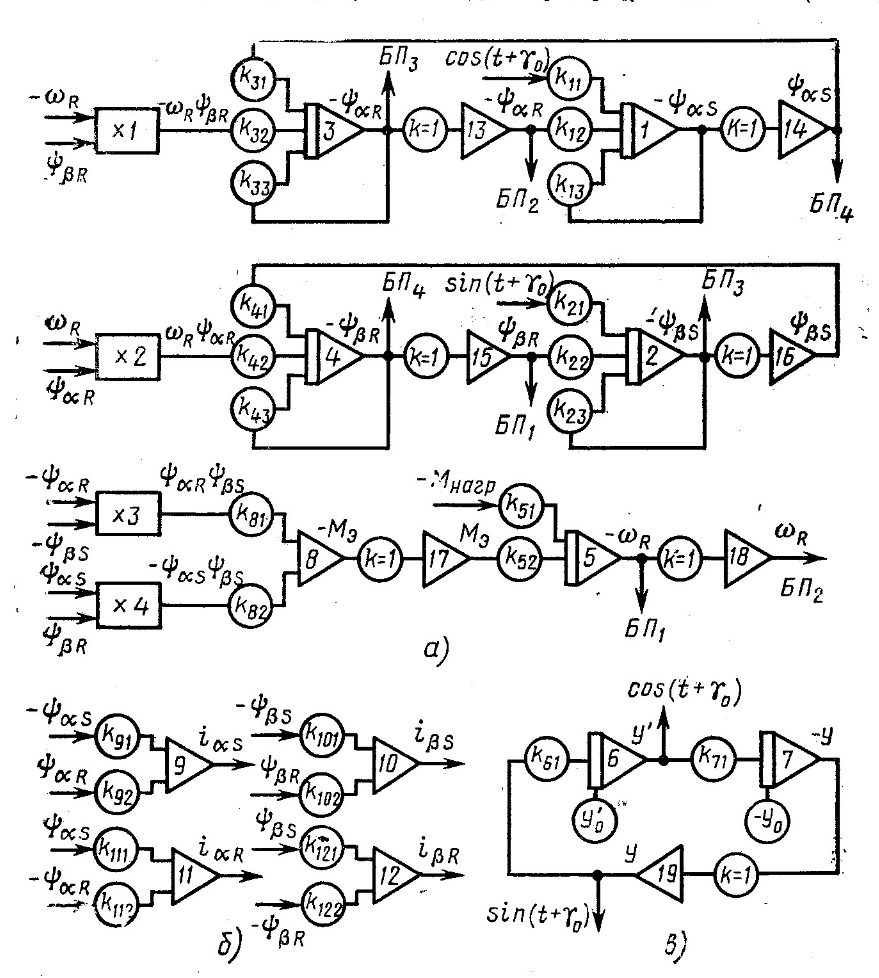


Рис. 14.1. Схема моделирования уравнений асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Первые два уравнения системы (14.7) содержат гармонические функции напряжений питания, которые формируются специальной схемой генератора гармонических колебаний (рис. 14.1, *в*). Такой генератор реализует дифференциальное уравнение маятника

$$d^2y/dt^2 = -y, \qquad (14.11)$$

где $y = \sin(t+\gamma_0)$; при $t=0$ значения $y_0 = \sin\gamma_0$, $y_0' = \cos\gamma_0$.

Для образования гармонических функций на АВМ потребуется еще два интегратора и один инвертор.

Цель работы — исследование основных динамических и статических характеристик трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

ПРОГРАММА РАБОТЫ

1. Набрать на АВМ модель системы дифференциальных уравнений асинхронного двигателя.

2. Произвести пуск двигателя. Определить ударный момент, ударный ток и время пуска при холостом ходе ($M_{\text{нагр}}=0$) и номинальной нагрузке ($M_{\text{нагр}}=M_{\text{н}}$).

3. Осуществить наброс нагрузки в установившемся режиме с $M_{\text{нагр}}=0$ до $M_{\text{нагр}}=M_{\text{н}}$. Определить пиковые значения тока, момента и время переходного режима.

4. Снять механическую характеристику двигателя в установившемся режиме $\omega_R=f(M_э)$ в диапазоне частот вращения ротора от синхронной ($\omega_R=\omega_c$) до критической ($\omega_R=\omega_{R\,\text{кр}}$). Определить перегрузочную способность двигателя.

5. Определить кратности пускового момента и пускового тока в установившемся режиме короткого замыкания.

ПОЯСНЕНИЯ И УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

Перед началом исследований следует ознакомиться с паспортными данными двигателя и рассчитать базисные величины (табл. 14.1), относительные значения параметров и коэффициенты при переменных в преобразованных уравнениях [см. (14.8)]. Абсолютные значения параметров должны быть заранее известны.

Таблица 14.1

Базисные величины	$U_б$, В	$I_б$, А	$Z_б$, Ом	$\omega_б$, рад/с	$t_б$, с	$\psi_б$, В·с	$P_б$, Вт	$M_б$, Н·м	$J_б$, кг·м²
Расчетные формулы	$\sqrt{2}U_{\text{н.ф}}$	$\sqrt{2}I_{\text{н.ф}}$	$\frac{U_б}{I_б}$	$2\pi f_1$	$\frac{1}{\omega_б}$	$U_б t_б$	$\frac{3}{2}U_б I_б$	$\frac{pP_б}{\omega_б}$	$\frac{pM_б}{\omega_б^2}$

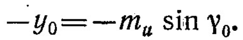
Набор модели. Для расчета коэффициентов передач решающих блоков необходимо выбрать масштабы переменных величин. Из практики моделирования пусковых режимов асинхронных микродвигателей могут быть рекомендованы следующие масштабы: напряжения $m_u=100$ В/ед.; тока $m_i=20$ В/ед.; потокосцепления $m_\psi=50$ В/ед.; угловой скорости $m_\omega=100$ В/ед.; момента $m_M=50$ В/ед.; времени $m_t=0{,}5$; гармонических функций $m_y=m_{y'}=m_u$.

По выбранным масштабам, используя формулы (13.8)—(13.11), рассчитываются коэффициенты передач решающих блоков (табл. 14.2). Коэффициенты передач решающих блоков, используемых в качестве инверторов, равны единице.

Таблица 14.2

Коэффициенты передач	$k_{11}=k_{21}$	$k_{12}=k_{22}$	$k_{13}=k_{23}$	$k_{31}=k_{41}$	$k_{32}=k_{42}$	$k_{33}=k_{43}$	$k_{51}=k_{52}$	$k_{61}=k_{71}$	$k_{81}=k_{82}$	$k_{91}=k_{101}$	$k_{92}=k_{102}=k_{111}=k_{121}$	$k_{112}=k_{122}$
Расчётные формулы	$\frac{m_\psi}{m_u m_t}$	$\frac{a_2}{m_t}$	$\frac{a_1}{m_t}$	$\frac{a_3}{m_t}$	$\frac{100}{m_\omega m_t}$	$\frac{a_4}{m_t}$	$\frac{a_5 m_\omega}{m_M m_t}$	$\frac{1}{m_t}$	$\frac{a_6 m_M}{0{,}01 m_\psi^2}$	$\frac{a_7 m_i}{m_\psi}$	$\frac{a_6 m_i}{m_\psi}$	$\frac{a_8 m_i}{m_\psi}$

Осуществив настройку коэффициентов передач на соответствующих решающих блоках, набирают модель в соответствии со схемой (рис. 14.1). На выходах блоков интегрирования *6* и *7* устанавливают начальные условия (В)



$$y_0' = m_u \cos\gamma_0; \quad -y_0 = -m_u \sin\gamma_0.$$

При нулевой начальной фазе питающего напряжения на интеграторе *6* устанавливается напряжение 100 В. Остальные блоки интегрирования имеют нулевые начальные условия. На вход сопротивления R_{51} подается напряжение, характеризующее нагрузку двигателя в масштабе момента.

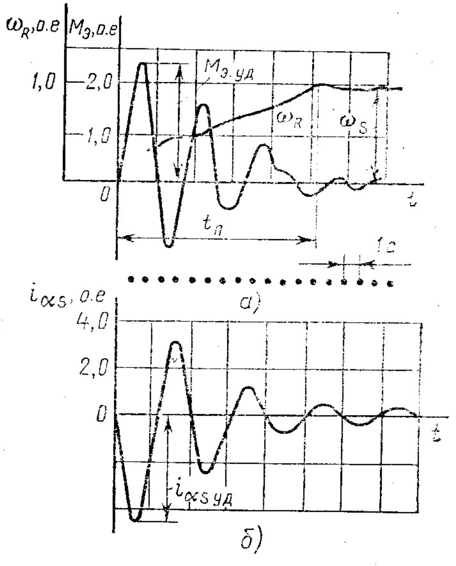


Рис. 14.2. Осциллограммы пуска асинхронного двигателя вхолостую

Пуск двигателя. Процесс пуска асинхронного двигателя сопровождается значительными бросками тока и электромагнитного момента. На рис. 14.2 показан характер изменения переменных $i_{\alpha S}$, $M_э$ и ω_R при пуске двигателя без нагрузки. Ударные значения момента (рис. 14.2, *а*) и тока (рис. 14.2, *б*) наблюдаются в течение первого полупериода изменения. По окончании процесса пуска без нагрузки (идеальный холостой ход) электромагнитный момент становится равным нулю, а частота вращения ротора достигает синхронной. Соблюдение этих условий свидетельствует о правильности набора модели на АВМ и балансировке операционных усилителей. Осциллографируя зависимости $i_{\alpha S}$, $M_э$, ω_R в функции *t*, определяют ударный ток, ударный момент и время пуска. Отметим, что ток $i_{\alpha S}$ равен мгновенному значению тока в одной из фаз обмотки статора. Для нахождения времени пуска — времени, за которое ротор, находящийся в неподвижном состоянии,

достигает установившейся частоты вращения, используется машинный отметчик времени. Значения переменных в реальных единицах пересчитываются по формуле

$$x_р = x_м x_б / m_x, \qquad (14.12)$$

где $x_р$ — реальное значение переменной; $x_м$ — значение машинной переменной, В; $x_б$ — базисная величина; m_x — масштаб.

При исследовании пуска двигателя под нагрузкой момент нагрузки устанавливается заранее с помощью делителя эталонного напряжения. При номинальной нагрузке подаваемое на вход сопротивления R_{51}* напряжение (В) рассчитывается по формуле

$$M_{нагр.н} = 9{,}55 (P_{Rн}/n_н)(m_M/M_б), \qquad (14.13)$$

где $P_{Rн}$ — номинальная мощность двигателя, Вт; $n_н$ — номинальная частота вращения ротора, об/мин.

Наброс нагрузки. Вначале осуществляется пуск двигателя без нагрузки. По достижении ротором установившейся частоты вращения на вход сопротивления R_{51} от делителя эталонного напряжения подается сигнал, соответствующий номинальной нагрузке [см. (14.13)].

Как и пуск двигателя, наброс нагрузки сопровождается бросками токов и электромагнитного момента. Осциллографируя $i_{\alpha S}$ и $M_э$, определяют их пиковые значения. Время переходного режима отсчитывается от момента наброса нагрузки до момента достижения ротором номинальной частоты вращения.

Перегрузочная способность двигателя. Аналоговую модель двигателя можно использовать для исследования как переходных процессов, так и установившихся режимов.

Для снятия механической характеристики двигателя $\omega_R = f(M_э)$ в установившемся режиме осуществляют пуск двигателя без нагрузки и по достижении ротором синхронной частоты вращения увеличивают с определенным шагом момент нагрузки ($\Delta M_{нагр} \approx \approx 0{,}25\ M_{нагр.н}$). Регистрация электромагнитного момента и частоты вращения ротора производится обычно цифровыми приборами АВМ по окончании переходного процесса наброса нагрузки, когда $M_э = M_{нагр}$ и $\omega_R = \text{const}$.

Для более точного определения максимального электромагнитного момента изменение нагрузки при частотах вращения, близких к критической, осуществляют с малым шагом. При этом определяют два момента нагрузки, отличающихся на малую величину. При меньшем значении момента двигатель работает устойчиво, а при большем — частота вращения ротора уменьшается до нуля. За максимальное значение электромагнитного момента принимается первое значение. Перегрузочная способность двигателя определяется по отношению максимального момента к номинальному: $k_M = M_{э.макс}/M_н$.

* В схеме моделирования (рис. 14.1) сопротивлению R_{51} соответствует коэффициент передачи k_{51}.

Режим короткого замыкания. В этом режиме ротор двигателя неподвижен ($\omega_R=0$). Реальный двигатель не может длительно находиться в таком режиме из-за больших токов короткого замыкания, вызывающих перегревание обмоток. При проведении исследований на аналоговых моделях такой опасности не существует.

Для реализации режима короткого замыкания на АВМ необходимо отключить интегратор *5*, моделирующий уравнение движения ротора. Тогда модель будет решать лишь электромагнитные переходные процессы. После их окончания с помощью цифровых приборов машины фиксируют установившиеся значения тока $i_{\alpha S \text{к}}$ и электромагнитного момента $M_{\text{э.к}}$, по которым рассчитывают кратность пускового тока и кратность пускового момента:

$$k_i=I_{S\text{к}}/I_{\text{н}}=i_{\alpha S\text{к}}I_{\text{б}}/(\sqrt{2}m_i I_{\text{н}}); \quad k_M=M_{\text{э.к}}/M_{\text{н}}=M_{\text{э.к}}M_{\text{б}}/(m_M M_{\text{н}}),$$

где $i_{\alpha S\text{к}}$ — амплитудное значение установившегося тока короткого замыкания на модели, В.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

В асинхронных двигателях малой мощности ударные значения пусковых моментов и токов практически не зависят от момента сопротивления. С увеличением момента нагрузки возрастает лишь время пуска двигателя. Относительные значения ударных моментов и токов в микродвигателях значительно меньше, чем в машинах большой мощности, за счет большего активного сопротивления обмотки статора. Ударный момент определяется токами переходного режима и вследствие этого отличается от начального пускового момента, найденного из режима короткого замыкания двигателя.

При набросе нагрузки пиковые значения моментов и токов зависят от изменения момента нагрузки, но не превышают значений ударных моментов и токов при пуске.

Полученные в результате исследования установившихся режимов работы асинхронного двигателя его перегрузочная способность и кратности начальных пусковых тока и момента рекомендуется сравнить с каталожными данными двигателя. Наблюдаемое при этом различие расчетных и каталожных данных объясняется тем, что в настоящей работе моделируется идеализированная машина, в которой не учитываются потери в стали, механические потери, изменение параметров, высшие гармонические.

Приведенная выше программа работ, ставящая целью приобретение навыков исследования асинхронных двигателей на АВМ и иллюстрацию возможности метода математического моделирования, охватывает лишь элементарные исследования. Однако описанная здесь модель может быть использована для решения более широкого круга задач.

Вопросы для самопроверки

1. Какие данные являются исходными при исследовании пуска асинхронного двигателя?
2. Какие величины являются базисными?

3. Во сколько раз изменяется время протекания переходных процессов при использовании системы относительных единиц?

4. Как выбираются масштабы переменных величин?

5. Как преобразовать дифференциальные уравнения к виду, удобному для моделирования?

6. В чем состоит принцип составления схемы моделирования преобразованных уравнений?

7. Каким образом воспроизводятся на АВМ гармонические функции?

8. Объясните различие между ударными и установившимися значениями пусковых токов и моментов.

9. Чем определяется время пуска асинхронного двигателя?

10. Какие внешние возмущения вызывают в асинхронном двигателе переходные процессы?

11. Каково соотношение электромагнитного момента и момента нагрузки в установившемся режиме?

12. Как определить перегрузочную способность двигателя?

13. Как осуществить режим короткого замыкания реального двигателя и его модели?

§ 14.2. АСИНХРОННЫЙ КОНДЕНСАТОРНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

В большинстве случаев асинхронный конденсаторный двигатель (АКД) состоит из симметричного короткозамкнутого ротора и двухфазного статора. При этом фазы обмотки статора расположены в пространстве под электрическим углом 90° и имеют различные числа витков. В одну из фаз двигателя включен конденсатор (рис. 14.3).

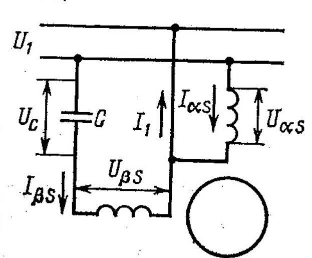


Рис. 14.3. Электрическая схема асинхронного конденсаторного двигателя

Дифференциальные уравнения такого двигателя в системе координат α, β в относительных единицах могут быть записаны в следующем виде [4, 15]:

уравнения электрического равновесия напряжений обмоток статора и ротора

$$\left.\begin{aligned} u_1 = u_{\alpha S} = r_{\alpha S} i_{\alpha S} + d\psi_{\alpha S}/dt; \quad & u_1 - u_C = u_{\beta S} = r_{\beta S} i_{\beta S} + d\psi_{\beta S}/dt; \\ 0 = r_{\alpha R} i_{\alpha R} + d\psi_{\alpha R}/dt + \omega_R \psi_{\beta R}; \quad & 0 = r_{\alpha R} i_{\beta R} + d\psi_{\beta R}/dt - \omega_R \psi_{\alpha R}; \end{aligned}\right\} \quad (14.14)$$

уравнения потокосцеплений обмоток статора и ротора

$$\left.\begin{aligned} \psi_{\alpha S} = x_{\alpha S} i_{\alpha S} + x_{m\alpha} i_{\alpha R}; \quad & \psi_{\alpha R} = x_{\alpha R} i_{\alpha R} + x_{m\alpha} i_{\alpha S}; \\ \psi_{\beta S} = x_{\beta S} i_{\beta S} + k x_{m\alpha} i_{\beta R}; \quad & \psi_{\beta R} = x_{\alpha R} i_{\beta R} + k x_{m\alpha} i_{\beta S}. \end{aligned}\right\} \quad (14.15)$$

Здесь $u_1 = \sin(t + \gamma_0)$ — мгновенное значение питающего напряжения сети; $u_C = x_C \int i_{\beta S} dt$ — напряжение на конденсаторе; $i_{\alpha S}$, $i_{\beta S}$ — реальные токи в фазах обмотки статора, отн. ед.; $i_{\alpha R}$, $i_{\beta R}$ — токи ротора, приведенные к фазе α обмотки статора; $r_{\alpha S}$, $r_{\beta S}$ — активные сопротивления обмотки статора; $r_{\alpha R}$ — активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к фазе α обмотки статора; полные индуктивные сопротивления обмоток статора и ротора

$$x_{\alpha S} = x_{\sigma\alpha S} + x_{m\alpha}; \quad x_{\beta S} = x_{\sigma\beta S} + k^2 x_{m\alpha}; \quad x_{\alpha R} = x_{\sigma\alpha R} + x_{m\alpha};$$

$x_{\sigma\alpha S}$, $x_{\sigma\beta S}$ — индуктивные сопротивления рассеяния фаз обмотки статора; $x_{\sigma\alpha R}$ — индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, приведенное к фазе α обмотки статора; $x_{m\alpha}$ — сопротивление взаимной индуктивности фазы α обмотки статора с обмоткой ротора; x_C — реактивное сопротивление конденсатора; $k = w_\beta k_{0\beta}/(w_\alpha k_{0\alpha})$ — отношение эффективных чисел витков фаз обмотки статора.

Уравнение движения ротора (отн. ед.)

$$J d\omega_R/dt + M_{\text{нагр}} = M_э, \tag{14.16}$$

где J — момент инерции ротора и вращающихся с ним масс; ω_R — электрическая угловая скорость ротора; t — относительное время; $M_{\text{нагр}}$ — момент внешних сил; $M_э$ — электромагнитный момент двигателя:

$$M_э = x_{m\alpha}(k i_{\beta S} i_{\alpha R} - i_{\alpha S} i_{\beta R}). \tag{14.17}$$

Система уравнений (14.14)—(14.17) описывает электромеханические процессы в асинхронном конденсаторном двигателе.

В тех случаях, когда токи в эквивалентных обмотках ротора интереса не представляют, они могут быть исключены из рассмотрения, если их выразить через потокосцепления. Из уравнений (14.15) найдем

$$i_{\alpha R} = \frac{x_{\alpha S}\psi_{\alpha R} - x_{m\alpha}\psi_{\alpha S}}{x_{\alpha S}x_{\alpha R} - x_{m\alpha}^2}; \quad i_{\beta R} = \frac{x_{\beta S}\psi_{\beta R} - k x_{m\alpha}\psi_{\beta S}}{x_{\beta S}x_{\alpha R} - k^2 x_{m\alpha}^2}. \tag{14.18}$$

Тогда электромагнитный момент АКД запишется в виде

$$M_э = k\psi_{\alpha S} i_{\beta S} - \psi_{\beta S} i_{\alpha S}/k. \tag{14.19}$$

Токи статора могут быть определены из (14.15):

$$i_{\alpha S} = \frac{x_{\alpha R}\psi_{\alpha S} - x_{m\alpha}\psi_{\alpha R}}{x_{\alpha S}x_{\alpha R} - x_{m\alpha}^2}; \quad i_{\beta S} = \frac{x_{\alpha R}\psi_{\beta S} - k x_{m\alpha}\psi_{\beta R}}{x_{\beta S}x_{\alpha R} - k^2 x_{m\alpha}^2}. \tag{14.20}$$

С учетом (14.18)—(14.20) система уравнений, преобразованная к виду, удобному для моделирования, запишется как

$$\left.\begin{aligned}
& d\psi_{\alpha S}/dt = \sin(t + \gamma_0) - a_1\psi_{\alpha S} + a_2\psi_{\alpha R};\\
& d\psi_{\beta S}/dt = u_{\beta S} - a_3\psi_{\beta S} + a_4\psi_{\beta R};\\
& d\psi_{\alpha R}/dt = a_5\psi_{\alpha S} - a_6\psi_{\alpha R} - \omega_R\psi_{\beta R};\\
& d\psi_{\beta R}/dt = a_7\psi_{\beta S} - a_8\psi_{\beta R} + \omega_R\psi_{\alpha R};\\
& du_C/dt = a_9 i_{\beta S};\ u_{\beta S} = \sin(t + \gamma_0) - u_C;\\
& d\omega_R/dt = a_{10}(M_э - M_{\text{нагр}});\\
& M_э = a_{11}\psi_{\alpha S} i_{\beta S} - a_{12}\psi_{\beta S} i_{\alpha S};\\
& i_{\alpha S} = a_{13}\psi_{\alpha S} - a_{14}\psi_{\alpha R};\ i_{\beta S} = a_{15}\psi_{\beta S} - a_{16}\psi_{\beta R}.
\end{aligned}\right\} \tag{14.21}$$

Здесь

$$\left.\begin{aligned}
&a_1=\frac{r_{\alpha S}x_{\alpha R}}{x_{\alpha S}x_{\alpha R}-x_{m\alpha}^2}; \quad a_2=\frac{r_{\alpha S}x_{m\alpha}}{x_{\alpha S}x_{\alpha R}-x_{m\alpha}^2};\\
&a_3=\frac{r_{\beta S}x_{\alpha R}}{x_{\beta S}x_{\alpha R}-k^2x_{m\alpha}^2}; \quad a_4=\frac{r_{\beta S}kx_{m\alpha}}{x_{\beta S}x_{\alpha R}-k^2x_{m\alpha}^2};\\
&a_5=a_2r_{\alpha R}/r_{\alpha S};\ a_6=a_5x_{\alpha S}/x_{m\alpha};\\
&a_7=a_4r_{\alpha R}/r_{\beta S};\ a_8=a_7x_{\beta S}/(kx_{m\alpha});\\
&a_9=x_C;\ a_{10}=1/J;\ a_{11}=k;\ a_{12}=1/k;\\
&a_{13}=a_1/r_{\alpha S};\ a_{14}=a_2/r_{\alpha S};\\
&a_{15}=a_3/r_{\beta S};\ a_{16}=a_4/r_{\beta S}.
\end{aligned}\right\} \qquad (14.22)$$

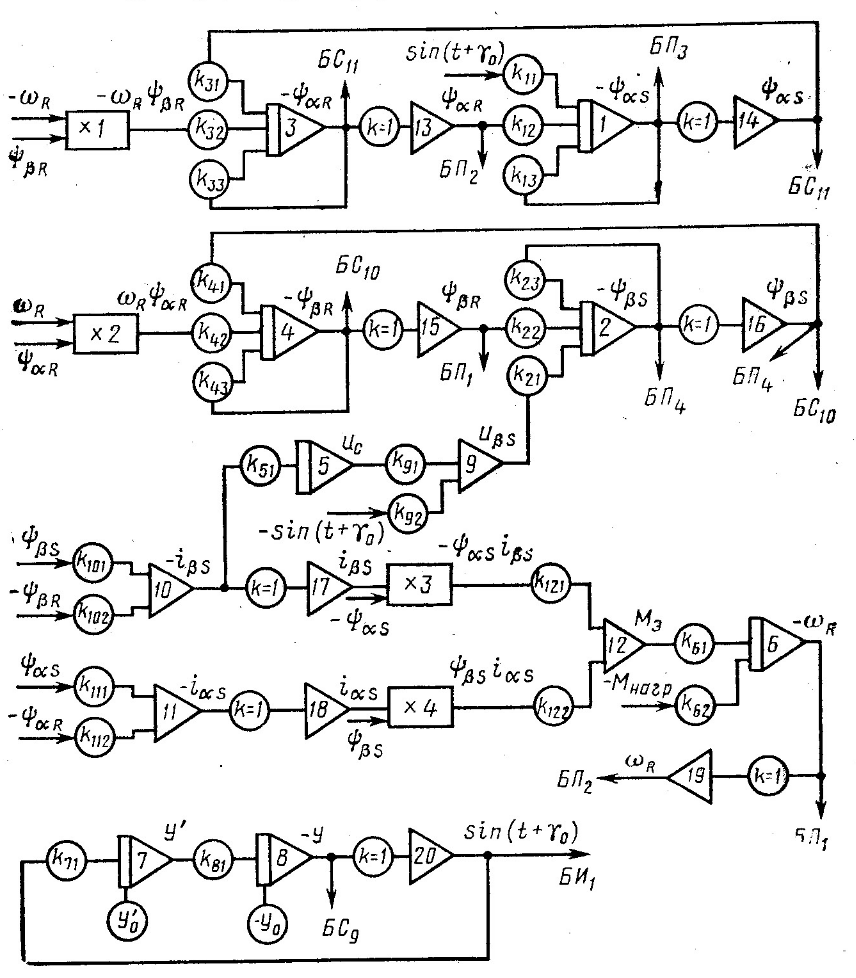


Рис. 14.4. Схема моделирования уравнений асинхронного конденсаторного двигателя

Схема моделирования системы дифференциальных уравнений (14.21) приведена на рис. 14.4. Она содержит пять интегросумматоров, три интегратора БИ, четыре блока произведения БП, четыре сумматора БС и восемь инверторов. Гармоническая функция напряжения питания воспроизводится схемой гармонических колебаний (см. § 14.1), набранной на интеграторах *7* и *8*.

Цель работы — исследование динамических характеристик асинхронного конденсаторного двигателя с короткозамкнутым ротором и поиск оптимальных значений емкостей конденсатора.

ПРОГРАММА РАБОТЫ

1. Набрать на АВМ схему моделирования асинхронного конденсаторного двигателя.

2. Исследовать влияние емкости конденсатора на пусковые и рабочие свойства двигателя: а) определить установившиеся значения пусковых токов $i_{\alpha S к}$, $i_{\beta S к}$, момента $M_{э.к}$ и напряжений на конденсаторе $u_{Cк}$ и конденсаторной фазе $u_{\beta S к}$ при $\omega_R=0$; б) осуществить пуск двигателя без нагрузки; определить время пуска $t_п$, частоту вращения холостого хода ω_{R0} и напряжения u_{C0} и $u_{\beta S0}$ при $\omega_R=\omega_{R0}$; в) снять механические характеристики двигателя в установившемся режиме.

3. Выбрать пусковую $C_п$ и рабочую $C_р$ емкости конденсатора, обеспечивающие заданные технические показатели двигателя в в динамическом и установившемся режимах.

ПОЯСНЕНИЯ И УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

Перед началом исследований следует ознакомиться с паспортными данными двигателя и рассчитать базисные величины (табл. 14.3), относительные параметры и коэффициенты при переменных в преобразованных уравнениях по (14.22).

Таблица 14.3

Базисные величины	$U_б$, В	$I_б$, А	$Z_б$, Ом	$\omega_б$, рад/с	$t_б$, с	$\Psi_б$, В·с	$P_б$, Вт	$M_б$, Н·м	$J_б$, кг·м^2
Расчетные формулы	$\sqrt{2}U_{1н}$	$\sqrt{2}I_{1н}$	$\frac{U_б}{I_б}$	$2\pi f_1$	$\frac{1}{\omega_б}$	$U_б t_б$	$U_б I_б$	$\frac{pP_б}{\omega_б}$	$\frac{pM_б}{\omega_б^2}$

Абсолютные значения параметров должны быть заранее определены расчетным или опытным путем.

Набор модели. При исследовании двигателей малой мощности для расчета коэффициентов передач решающих блоков могут быть рекомендованы следующие масштабы переменных величин: напряжений $m_{u1}=m_{u\alpha}=100$ В/ед.; $m_{u\beta}=m_{uk}=m_{u1}/(2k)$; токов $m_{i\alpha}=$ $=20$ В/ед.; $m_{i\beta}=km_{i\alpha}$; потокосцеплений $m_{\psi\alpha}=50$ В/ед.; $m_{\psi\beta}=$

$=m_{\psi\alpha}/(2k)$; угловой скорости $m_\omega=100$ В/ед; момента $m_M=30$ В/ед; времени $m_t=0{,}5$. Коэффициенты передач решающих блоков рассчитываются по формулам (13.8)—(13.11) и заносятся в табл. 14.4.

Таблица 14.4

Коэффициенты передач	k_{11}	k_{12}	k_{13}	k_{21}	k_{22}	k_{23}	k_{31}	k_{32}	k_{33}	k_{41}	k_{42}	k_{43}	k_{51}
Расчетные формулы	$\frac{m_{\psi\alpha}}{m_{u1}m_t}$	$\frac{a_2}{m_t}$	$\frac{a_1}{m_t}$	$\frac{m_{\psi\alpha}}{m_{u1}m_t}$	$\frac{a_4}{m_t}$	$\frac{a_3}{m_t}$	$\frac{a_5}{m_t}$	$\frac{200k}{m_\omega m_t}$	$\frac{a_6}{m_t}$	$\frac{a_7}{m_t}$	$\frac{50}{km_\omega m_t}$	$\frac{a_8}{m_t}$	$\frac{a_9 m_{uk}}{m_{i\beta}m_t}$

Продолжение табл. 14.4

Коэффициенты передач	$k_{61}=k_{62}$	$k_{71}=k_{81}$	k_{91}	k_{92}	k_{101}	k_{102}	k_{111}	k_{112}	k_{121}	k_{122}
Расчетные формулы	$\frac{a_{10}m_\omega}{m_M m_t}$	$\frac{11}{m_t}$	1,0	$\frac{1}{2k}$	$\frac{a_{15}k^2 m_{i\alpha}}{0{,}5m_{\psi\alpha}}$	$\frac{a_{16}k^2 m_{i\alpha}}{0{,}5m_{\psi\alpha}}$	$\frac{a_{13}m_{i\alpha}}{m_{\psi\alpha}}$	$\frac{a_{14}m_{i\alpha}}{m_{\psi\alpha}}$	$\frac{100m_M}{m_{\psi\alpha}m_{i\alpha}k}$	$\frac{200km_M}{m_{\psi\alpha}m_{i\alpha}}$

Осуществив настройку коэффициентов передач, приступают к набору модели АКД в соответствии со схемой моделирования (рис. 14.4). На выходе блоков интегрирования *7* и *8* устанавливают начальные условия (В)

$$y_0'=m_{u1}\cos\gamma_0; \quad -y_0=-m_{u1}\gamma_0,$$

где γ_0 — начальный фазовый угол питающего напряжения.

Исследование влияния емкости конденсатора на пусковые и рабочие свойства двигателя. Выполнение этого пункта программы связано с перестройкой на модели коэффициента передачи $k_{51}=x_C m_{u1}/(2k^2 m_{i\alpha}m_t)$. Для сокращения времени на перестройку рекомендуется выполнять всю программу исследований, предусмотренную п. 2, для каждого значения емкости конденсатора. При указанных масштабах переменных модель позволяет реализовать изменение относительного реактивного сопротивления конденсатора в диапазоне $0{,}04\,k^2<x_C<4k^2$.

При определении установившихся значений пусковых ($\omega_R=0$) токов $i_{\alpha S\text{к}}$, $i_{\beta S\text{к}}$, момента $M_{\text{э.к}}$, напряжений $u_{C\text{к}}$ и $u_{\beta S\text{к}}$ интегратор *6*, моделирующий уравнение движения ротора, должен быть отключен. По окончании электромагнитных переходных процессов с помощью цифровых приборов машины фиксируют амплитудные значения искомых величин. Связь между машинными значениями переменных и их реальными величинами устанавливается выражением (14.2).

Для нахождения времени пуска двигателя из неподвижного состояния до установившейся частоты вращения используется машин-

ный отметчик времени. Подключив интегратор 6 и осуществив пуск двигателя на модели без нагрузки ($M_{нагр}=0$), по осциллограмме $\omega_R=f(t)$ определяют время пуска $t_п$, частоту вращения холостого хода ω_{R0} (рис. 14.5) и нестабильность частоты вращения $N_0=(\omega_{Rмакс}-\omega_{Rмин})/\omega_{R0}$. С помощью цифровых приборов АВМ фиксируются напряжения u_{C0} и $u_{\beta S0}$.

Механические характеристики двигателя $\omega_R=f(M_э)$ в установившемся режиме снимаются по методике, изложенной в § 14.1.

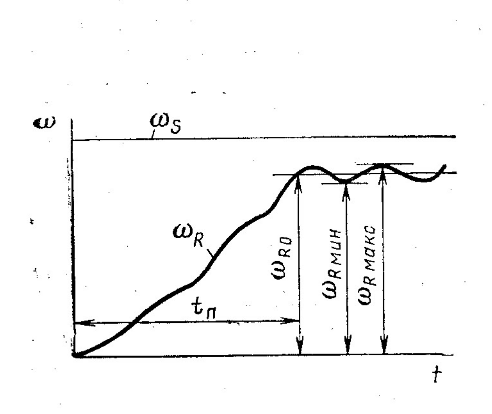


Рис. 14.5. Осциллограмма угловой скорости ротора АКД при пуске

Рис. 14.6. Кривые, показывающие влияние емкости конденсатора на пусковые свойства АКД

В АКД при емкости конденсатора, не обеспечивающей круговое вращающееся поле, электромагнитный момент содержит пульсирующую с двойной частотой составляющую. В этом случае фиксируется средний вращающий момент, равный моменту нагрузки ($M_{э.ср}=M_{нагр}$). При снятии механических характеристик АКД определяются также токи $i_{\alpha S}$, $i_{\beta S}$ и напряжение на конденсаторной фазе $u_{\beta S}$.

Выбор пускового и рабочего конденсатора. По результатам исследований строятся зависимости искомых величин от емкости конденсатора (рис. 14.6). Пусковая емкость $C_п$ выбирается из условия обеспечения минимального времени пуска при заданных кратностях начальных пусковых токов и момента; рабочая емкость конденсатора $C_р$ — из условия обеспечения номинальной мощности при заданной кратности максимального электромагнитного момента и допустимой степени эллиптичности магнитного поля. Оценка эллиптичности осуществляется с помощью осциллографа по фигурам Лиссажу. Для этого, установив одинаковое усиление по осям осциллографа, подают на его пластины токи модели $i_{\alpha S}$ и $i_{\beta S}$. В установившемся режиме при рекомендованных масштабах токов на экране осциллографа появится в общем случае эллипс, а при выполне-

нии условий образования кругового вращающегося поля — окружность. По соотношению осей эллипса можно судить о степени эллиптичности магнитного поля (см. § 1.2).

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

В общем случае в воздушном зазоре АКД образуется эллиптическое магнитное поле. Наименьшую степень эллиптичности поля (круговое вращающееся поле) можно получить лишь при одной вполне определенной емкости (см. § 5.3). С увеличением емкости степень эллиптичности поля вначале уменьшается, а затем возрастает. Пусковой момент достигает максимального значения при емкости несколько большей, чем емкость, обеспечивающая наименьшую степень эллиптичности поля. Объясняется это тем, что с увеличением емкости возрастает напряжение на конденсаторной фазе.

При эллиптическом магнитном поле электромагнитный момент АКД содержит пульсирующую составляющую, обусловленную взаимодействием тока прямой (обратной) последовательности статора с током обратной (прямой) последовательности ротора. Наличие пульсирующей составляющей момента приводит к увеличению длительности переходного процесса пуска двигателя.

При неизменной емкости напряжения на конденсаторе и конденсаторной фазе не остаются постоянными в процессе пуска. Максимальные значения напряжений u_C и $u_{\beta S}$ наблюдаются при холостом ходе. Частота вращения холостого хода уменьшается с возрастанием эллиптичности поля вследствие увеличения тормозного момента от токов обратной последовательности.

Анализ характеристик двигателя в установившемся режиме приведен в § 5.1, 5.3.

Вопросы для самопроверки

1. Назовите параметры, входящие в систему дифференциальных уравнений АКД.
2. Какой диапазон варьирования реактивного сопротивления конденсатора позволяет реализовать модель АКД?
3. Коэффициент передачи какого блока подлежит перестройке при изменении емкости конденсатора?
4. Как определить установившиеся значения пусковых токов и момента?
5. Как связаны реальные переменные с переменными на АВМ?
6. Какова методика определения времени пуска двигателя и частоты вращения холостого хода?
7. Что понимается под нестабильностью частоты вращения?
8. Как изменяется напряжение на конденсаторной фазе в процессе пуска?
9. Объясните зависимость времени пуска от емкости конденсатора.
10. Как изменяется частота вращения холостого хода с изменением емкости конденсатора?
11. Почему в АКД электромагнитный момент содержит пульсирующую составляющую?
12. Объясните зависимость пускового момента от емкости конденсатора.
13. Как выбрать пусковую и рабочую емкости?

Глава 15

ИССЛЕДОВАНИЕ НА АВМ СИНХРОННЫХ МИКРОДВИГАТЕЛЕЙ

§ 15.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ВХОДА В СИНХРОНИЗМ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С АСИНХРОННЫМ ПУСКОМ

При расчетах, проектировании и испытаниях синхронных микродвигателей первостепенное значение имеет определение предельного момента нагрузки, при котором происходит надежное втягивание ротора в синхронизм. Такой момент нагрузки называется *моментом входа в синхронизм.* Момент входа, а следовательно, и номинальная мощность синхронных микродвигателей с асинхронным пуском зависят как от характера изменения, так и от значений асинхронного и синхронизирующего моментов в зоне синхронизации, а также от момента инерции ротора и связанных с ним вращающихся масс. Одно и то же значение момента входа может быть получено при выборе различных сочетаний пусковых и угловых механических характеристик, соотношение и связь между которыми определяют энергетические показатели двигателя в синхронном режиме.

Процесс вхождения ротора синхронного двигателя в синхронизм является переходным электромеханическим процессом и описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений синхронной машины. В большинстве случаев механическая постоянная времени синхронных двигателей значительно превышает электромагнитные постоянные времени обмоток статора и ротора. Поэтому на практике часто исследуют не всю систему уравнений, а лишь уравнение движения ротора, считая при этом, что электромагнитные процессы протекают значительно быстрее механических процессов и динамические моментно-угловые и моментно-частотные характеристики тождественны статическим. Тогда исходным уравнением для исследования процесса вхождения в синхронизм синхронных двигателей с асинхронным пуском является уравнение движения ротора (абс. ед.)

$$M_{с}+M_{ас}=M_{нагр}+(J/p)(d\omega_R/dt). \qquad (15.1)$$

Для явнополюсных возбужденных двигателей при частотах вращения, близких к синхронной (при малых скольжениях), синхронизирующий момент можно представить суммой моментов:

$$M_{с}=M_{вm}\sin(\theta_U+\alpha)+M_{dqm}\sin 2\theta_U+M_{т}. \qquad (15.2)$$

В этом уравнении максимальные значения основного $M_{вm}$ и реактивного M_{dqm} моментов, угол сдвига угловых характеристик α, тормозной момент $M_{т}=M_{вт}+M_{dqт}$ ($M_{т}<0$) зависят от параметров двигателя и могут быть рассчитаны по формулам, приведенным в [2,7] (см. также § 6.1).

Асинхронный момент в зоне синхронизации изменяется прямо пропорционально скольжению:

$$M_{ac}=M'_{ac}s, \qquad (15.3)$$

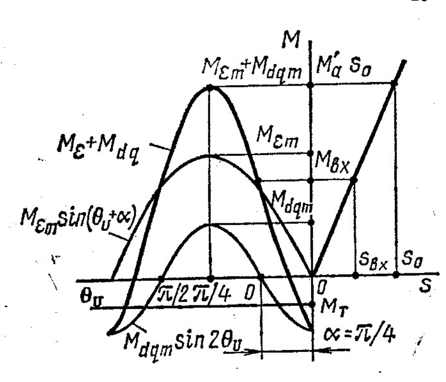


Рис. 15.1. Угловые и механическая характеристики синхронного двигателя с возбуждением на роторе

где M_{ac}' — крутизна пусковой механической характеристики; $s=(\omega_c-\omega_R)/\omega_c$ — скольжение.

На рис. 15.1 показаны моментно-частотная и моментно-угловые характеристики синхронного двигателя при $\alpha=\pi/4$.

Угол θ_U, характеризующий нагрузку двигателя, изменяется в процессе синхронизации в широких пределах:

$$\theta_U=\int_0^t(\omega_c-\omega_R)\,dt+\theta_{U0}, \qquad (15.4)$$

где $\omega_c=2\pi f_1$ — электрическая угловая скорость поля статора; $\omega_R=p\Omega_R$ — электрическая угловая скорость ротора.

Используя уравнение (15.4), можно установить связь скольжения с углом нагрузки и частотой вращения ротора:

$$s=d\theta_U/(\omega_c dt);\quad d\omega_R/dt=-\omega_c ds/dt.$$

Тогда уравнение движения ротора в зоне синхронизации можно записать в виде

$$(J/p)(d^2\theta_U/dt^2)+(M'_{ac}/\omega_c)(d\theta_U/dt)+$$
$$+M_{\varepsilon m}\sin(\theta_U+\alpha)+M_{dqm}\sin 2\theta_U+M_т=M_{нагр}. \qquad (15.5)$$

Если принять в качестве базисных величин основной максимальный момент и частоту собственных колебаний

$$M_б=M_{\varepsilon m};\quad \omega_б=\omega_0=\sqrt{pM_{\varepsilon m}/J};\quad t_б=1/\omega_0,$$

то уравнение (15.5), преобразованное к виду, удобному для моделирования, запишется в относительных единицах как

$$d^2\theta_U/d\tau^2=-a_1 d\theta_U/d\tau-\sin(\theta_U+\alpha)-a_2\sin 2\theta_U+a_3. \qquad (15.6)$$

Здесь $a_1=\omega_0 M_{ac}'/(\omega_c M_{\varepsilon m})$ — коэффициент демпфирования; $a_2=M_{dqm}/M_{\varepsilon m}$ — коэффициент реактивности; $a_3=(M_{нагр}-M_т)/M_{\varepsilon m}$ — коэффициент нагрузки; $\tau=\omega_0 t$ — безразмерное время.

При исследовании синхронизирующих свойств неявнополюсного двигателя уравнение (15.6) значительно упрощается, так как в этом случае $\alpha=0$ и $a_2=0$.

Для реактивного двигателя уравнение (15.6) принимает вид

$$d^2\theta_U/dt^2=-a_1' d\theta_U/d\tau-\sin 2\theta_U+a_3', \qquad (15.7)$$

где

$$a'_1=\omega_0 M'_{ac}/(\omega_c M_{dqm});\ a'_3=(M_{нагр}-M_{dq\,т})/M_{dqm};\ \omega_0=\sqrt{pM_{dqm}/J}.$$

Механические процессы, описываемые уравнениями (15.6), (15.7), протекают в ω_0 раз медленнее реальных.

Схема моделирования дифференциального нелинейного неоднородного уравнения (15.6) приведена на рис. 15.2. Схема содержит интегросумматор, интегратор, два блока нелинейностей, воспроизводящих тригонометрические функции, блок произведения, реализующий гармоническую функцию двойного аргумента, сумматор и инвертор. Сумматор обеспечивает требуемый сдвиг угловых характеристик основного и реактивного моментов и реализует решение уравнения

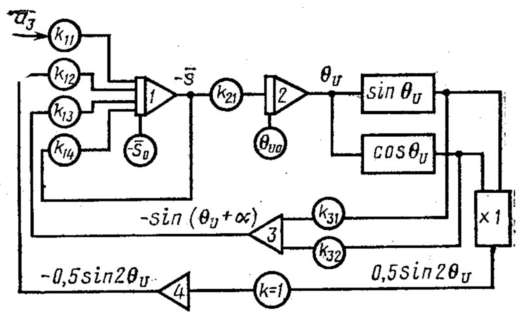


Рис. 15.2. Схема моделирования уравнения движения ротора синхронного двигателя

$$\sin(\theta_U+\alpha)=a_4\cos\theta_U+a_5\sin\theta_U, \qquad (15.8)$$

где

$$a_5=\sqrt{1-a_4^2};\ \alpha=\arcsin a_4.$$

Входным сигналом схемы моделирования является коэффициент нагрузки a_3, выходным — либо угол θ_U, либо относительное скольжение $\bar{s}=d\theta_U/d\tau=s\omega_c/\omega_0$. Начальное относительное скольжение рекомендуется определять из условия

$$\bar{s}_0\geqslant(1+a_2)/a_1. \qquad (15.9)$$

При выполнении этого условия момент входа в синхронизм не зависит от начального угла нагрузки.

Цель работы — исследовать процесс синхронизации синхронных двигателей с возбужденным и невозбужденным ротором.

ПРОГРАММА РАБОТЫ

1. Набрать на АВМ схему моделирования дифференциального уравнения, описывающего движение ротора в зоне синхронизации.

2. Исследовать влияние коэффициента демпфирования при его значениях, равных 0,5; 1,0; 1,5, на момент входа в синхронизм неявнополюсного синхронного двигателя ($a_2=0$).

3. Исследовать влияние коэффициента реактивности при его значениях, равных 0,25; 0,5; 1,0, на синхронизирующие свойства двигателя при $a_1=1$ и $\alpha=0$.

4. Исследовать влияние угла сдвига моментно-угловых харак-

теристик ($\alpha=0$; $\pi/4$; $\pi/2$) на момент входа в синхронизм при $a_1=1$ и $a_2=0{,}5$.

5. Определить момент входа в синхронизм синхронного реактивного двигателя при a_1', равных 0,5; 1,0; 1,5.

ПОЯСНЕНИЕ И УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

В процессе вхождения двигателя в синхронизм угол нагрузки изменяется в широких пределах. Для повышения точности решения уравнения движения ротора рекомендуется воспроизводить синусно-косинусные зависимости на нелинейных блоках лишь в диапазоне изменения углов θ_U от 0 до 2π, а для расширения пределов изменения углов нагрузки дополнять схему моделирования устройством периодизации угла, собираемым на выходе интегратора *2* (рис. 15.3).

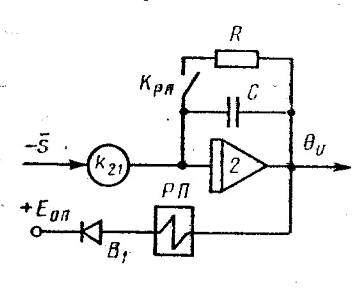


Рис. 15.3. Схема устройства периодизации угла нагрузки

Набор модели. Основной элемент устройства периодизации — высокочувствительное поляризованное реле *РП*, замыкающие контакты которого $K_{\text{РП}}$ включены параллельно интегрирующему конденсатору через разрядное сопротивление R. К обмотке возбуждения реле прикладывается с одного конца через вентиль B_1 опорное напряжение $E_{\text{оп}}$, подбираемое таким образом, что при достижении на выходе интегратора *2* напряжения, соответствующего углу $\theta_U=2\pi$, реле срабатывает и интегрирующий конденсатор разряжается до нуля. При этом время разряда конденсатора должно быть значительно меньше времени изменения угла θ_U от 0 до 2π. Это условие осуществляется подбором сопротивления R.

На интеграторе *1* (см. рис. 15.2) устанавливают начальные условия в масштабе скольжения. В данной работе рекомендуется использовать следующие масштабы переменных: скольжения $m_s=100/2=50$ В/ед.; угла нагрузки $m_\theta=100/2\pi=15{,}9$ В/ед.; тригонометрических функций $m_{\sin}=50$ В/ед.; времени $m_\tau=1{,}0$; нагрузки $m_M=50$ В/ед. Тогда для выполнения условия (15.9) на выходе интегратора *1* надо установить начальное скольжение (В)

$$\bar{s}_0=m_s(1+a_2)/a_1=100,$$

поскольку при выполнении любого из пунктов программы работы $[(1+a_2)/a_1]_{\text{макс}}\leqslant 2$.

При моделировании сунусно-косинусные функции аппроксимируются кусочно-линейным методом. Рекомендуемые карты настройки нелинейных блоков, обеспечивающие погрешность не более 2%, приведены в табл. 15.1, 15.2.

В процессе синхронизации двигателя при малом коэффициенте демпфирования угол нагрузки может принимать отрицательные зна-

Таблица 15.1

Квадранты	I	IV		IV		I		I	
Диоды	1	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_{отп}$, В	0	13,0	22,2	27,8	37,0	63,0	72,2	77,8	87,0
$U_{вх}$, θ_U, В	13,0	22,2	27,8	37,0	63,0	72,2	77,8	87,0	100
$U_{вых}$, $\sin\theta_U$, В	37,5	50,0	50,0	37,5	—37,5	—50,0	—50,0	—37,5	0

Таблица 15.2

Квадранты	F_0	IV		I		I		IV	
Диоды		1	2	3	4	5	6	7	8
$U_{отп}$, В		2,8	12,0	38,0	47,2	52,8	62,0	88,0	97,2
$U_{вх}$, θ_U, В	0	12,0	38,0	47,2	52,8	62,0	88,0	97,2	100
$U_{вых}$, $\cos\theta_U$, В	50	37,5	—37,5	—50,0	—50,0	—37,5	37,5	50,0	50,0

чения. Для учета этого явления следовало бы дополнить схему моделирования еще двумя нелинейными блоками, воспроизводящими синусно-косинусные зависимости отрицательного аргумента. Однако для выполенния указанной программы работ, в которой качания ротора не исследуются, можно принять, что процесс синхронизации заканчивается, как только скольжение достигает нуля. При этом угол нагрузки принимает лишь положительные значения.

Уравнение (15.6) записано в критериальной форме и поэтому может быть исследовано без задания реальных исходных данных путем дискретного варьирования коэффициентов при переменных. В большинстве случаев значения этих коэффициентов находятся в пределах: коэффициент демпфирования $a_1=0\div2{,}0$; коэффициент реактивности $a_2=0\div1{,}0$. Искомой величиной при решении уравнения (15.6) является коэффициент предельной нагрузки $a_{3вх}$, при котором двигатель еще втягивается в синхронизм. Нагрузка в выбранном масштабе задается подачей напряжения на вход интегратора *1* (см. рис. 15.2) через сопротивление R_{11}* от делителя эталонного напряжения.

Влияние коэффициента демпфирования. Исследование влияния коэффициента демпфирования на момент входа в синхронизм проводится для неявнополюсного двигателя. Так как реактивный момент у такого двигателя отсутствует ($M_{dqm}=0$; $a=0$; $a_2=0$), то из схемы моделирования (см. рис. 15.2) следует исключить блок произведения и блок нелинейности, воспроизводящий косинусную функцию угла нагрузки ($k_{12}=k_{32}=0$). При этом сумматор *3* работает в режиме инвертора, так как $a_4=0$; $a_5=1$; $k_{31}=1$. Остальные коэффи-

* В схеме модолирования сопротивлению R_{11} соответствует коэффициент передачи k_{11}.

циенты передач решающих блоков рассчитываются по формулам (13.8), (13.9):

$$k_{11}=\frac{m_s}{m_M m_\tau}=1;\quad k_{13}=\frac{m_s}{m_{\sin} m_\tau}=1;\quad k_{14i}=\frac{a_{1i}}{m_\tau};$$

$$k_{21}=\frac{m_\theta}{m_s m_\tau}=0{,}318.$$

Определение предельной нагрузки, при которой двигатель еще втягивается в синхронизм, проводится для трех значений коэффициента демпфирования a_1, равных 0,5; 1,0; 1,5. Предельная нагрузка находится путем задания на делителе эталонного напряжения ряда значений коэффициента $a_3=(0\div 1)m_M$. При этом определяются два граничных значения нагрузки, незначительно отличающихся и удовлетворяющих следующему условию: при меньшей нагрузке двигатель еще втягивается в синхронизм, а при большей — продолжает работать в асинхронном режиме. За момент входа в синхронизм принимается первое значение нагрузки. Переход от машинных переменных к реальным осуществляется по формуле (14.12).

Влияние коэффициента реактивности. Для учета составляющей синхронизирующего момента, обусловленной реактивностью двигателя, в схему (см. рис. 15.2) вводится блок произведения тригонометрических функций. Так как, согласно программе работы, исследование проводится при коэффициенте демпфирования $a_1=1$ и нулевом сдвиге угловых характеристик $\alpha=0$, коэффициенты передач решающих блоков принимают следующие значения:

$$k_{11}=k_{13}=k_{14}=k_{31}=1;\quad k_{21}=0{,}318;\quad k_{32}=0;$$

$$k_{12i}=0{,}5a_{2i}m_s/(0{,}01m_{\sin}^2 m_\tau).$$

Методика определения предельного коэффициента нагрузки, соответствующего моменту входа в синхронизм, изложена выше.

Влияние угла сдвига моментно-угловых характеристик. При выполнении программы работ п. 4 функционируют все решающие элементы схемы моделирования (см. рис. 15.2). Коэффициенты передач решающих блоков при коэффициенте демпфирования $a_1=1$ и коэффициенте реактивности $a_2=0{,}5$ имеют следующие значения:

$$k_{11}=k_{13}=k_{14}=1;\ k_{12}=0{,}5;\ k_{21}=0{,}318;\ k_{31}=a_5;\ k_{32}=a_4.$$

При $\alpha=0$ значения $a_4=0$, $a_5=1$ и значение предельного коэффициента нагрузки может быть взято из данных предыдущего опыта. При $\alpha=\pi/4$ значение $a_4=a_5=0{,}707$; при $\alpha=\pi/2$ значения $a_4=1$; $a_5=0$.

Исследование синхронного реактивного двигателя. В синхронном реактивном двигателе отсутствует основная составляющая синхронизирующего момента ($M_{\varepsilon m}=0$) и движение ротора в зоне синхронизации описывается уравнением (15.7). Для его реализации необходимо исключить из схемы моделирования (см. рис. 15.2) сум-

матор *3* ($k_{13}=k_{31}=k_{32}=0$). Оставляя прежними масштабы переменных, найдем коэффициенты передач решающих блоков:

$$k_{11}=k_{12}=1;\ k_{21}=0{,}318;\ k_{14i}=a'_{1i}/m_{\tau}.$$

Методика определения момента входа в синхронизм реактивного двигателя такая же, как в предыдущих опытах.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Коэффициент демпфирования может увеличиваться либо за счет возрастания крутизны асинхронной механической характеристики, либо за счет уменьшения момента инерции вращающихся вместе с ротором масс. В первом случае увеличивается энергия синхронизирующих сил ($W_c \equiv M_c + M_{ac}$), во втором — уменьшается кинетическая энергия вращающих масс ($W_к \equiv J$), противодействующая работе синхронизирующих сил. Этим и объясняется увеличение момента входа двигателя в синхронизм с ростом коэффициента демпфирования. Теоретически при $M_{ac}' \to \infty$ или $J \to 0$ момент входа в синхронизм достигает максимального значения синхронизирующего момента. Добавление реактивного момента при сохранении основного момента приводит к возрастанию результирующего синхронизирующего момента, а следовательно, и момента входа, причем увеличение момента входа проявляется тем больше, чем выше коэффициент демпфирования.

Подобное явление наблюдается и при изменении угла сдвига моментно-угловых характеристик явнополюсного возбужденного двигателя. Значение $\alpha=0$ соответствует угловой характеристике синхронного двигателя с электромагнитным возбуждением. При $\alpha=\pi/4$ основной и реактивный моменты достигают максимальных значений при одном и том же угле нагрузки. Такую угловую характеристику можно получить в синхронном двигателе с комбинированным ротором, например ротором с аксиальным расположением на валу явновыраженных полюсов и постоянных магнитов. Угловой характеристикой при $\alpha=\pi/2$ обладают синхронные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов. Синхронный реактивный двигатель имеет значительно меньшую энергию синхронизирующих сил по сравнению с возбужденным двигателем и поэтому развивает меньший момент входа. Однако при увеличении коэффициента демпфирования значение момента входа также стремится к максимальному синхронизирующему моменту.

Вопросы для самопроверки

1. При каких допущениях проводится решение уравнения движения ротора?
2. Каково назначение устройства периодизации угла нагрузки?
3. Какова методика определения момента входа?
4. Что понимается под моментом входа в синхронизм?
5. Какие параметры определяют синхронизирующие свойства синхронного двигателя?
6. Как зависит момент входа в синхронизм от момента инерции нагрузки?

7. Какое влияние на момент входа оказывает реактивная составляющая синхронизирующего момента?

8. Как реализуется на АВМ сдвиг угловых характеристик возбужденного явнополюсного двигателя?

9. Как воспроизводится на АВМ реактивная составляющая синхронизирующего момента?

10. Из каких условий выбирается начальное скольжение?

11. Какие изменения необходимо произвести в схеме моделирования (рис. 15.2) для получения модели синхронного реактивного двигателя?

12. Объясните влияние угла α на момент входа.

13. Как зависит момент входа от крутизны пусковой механической характеристики?

§ 15.2. СРАВНЕНИЕ ПУСКОВЫХ, СИНХРОНИЗИРУЮЩИХ И РАБОЧИХ СВОЙСТВ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В качестве объектов сравнения приняты синхронный двигатель с постоянными магнитами (СДПМ) и синхронный реактивный двигатель (СРД).

Электромеханические процессы, происходящие при пуске, синхронизации и в рабочем режиме СДПМ, с учетом общепринятых в теории синхронных машин допущений описываются в координатных осях d и q, жестко связанных с ротором, следующей системой нелинейных дифференциальных уравнений [7, 15]:

уравнения равновесия напряжений обмоток статора и ротора

$$\left.\begin{aligned} u_d &= r_S i_d + d\psi_d/dt - \omega_R\psi_q;\\ u_q &= r_S i_q + d\psi_q/dt + \omega_R\psi_d;\\ 0 &= r_D i_D + d\psi_D/dt;\\ 0 &= r_Q i_Q + d\psi_Q/dt; \end{aligned}\right\} \qquad (15.10)$$

уравнения потокосцеплений обмоток статора и ротора

$$\left.\begin{aligned} &\psi_d = x_d i_d + x_{ad} i_D + \varepsilon_0;\ \psi_D = x_D i_D + x_{ad} i_d + \varepsilon_0;\\ &\psi_q = x_q i_q + x_{aq} i_Q;\ \psi_Q = x_Q i_Q + x_{aq} i_q; \end{aligned}\right\} \qquad (15.11)$$

уравнение движения ротора

$$J d\omega_R/dt + M_{\text{нагр}} = M_э. \qquad (15.12)$$

В формулах (15.10)—(15.12) r_S и r_D, r_Q — активные сопротивления обмотки статора и эквивалентных обмоток ротора по осям d, q; x_d, x_q и x_D, x_Q — полные индуктивные сопротивления фаз статора и ротора по осям d, q:

$$x_d = x_{\sigma S} + x_{ad};\quad x_q = x_{\sigma S} + x_{aq};$$
$$x_D = x_{\sigma D} + x_{ad};\quad x_Q = x_{\sigma Q} + x_{aq},$$

$x_{\sigma S}$ и $x_{\sigma D}$, $x_{\sigma Q}$ — индуктивные сопротивления рассеяния обмоток статора и ротора; x_{ad}, x_{aq} — индуктивные сопротивления реакции якоря по осям d, q; J — момент инерции вращающихся масс; ω_R — электрическая угловая скорость ротора; $M_{\text{нагр}}$ — момент внешних сил; $M_э$ — электромагнитный момент двигателя:

$$M_э = \psi_d i_q - \psi_q i_d. \qquad (15.13)$$

Система уравнений (15.10)—(15.13) записана в относительных единицах. Выражения для базисных величин приведены в гл. 13. При записи системы уравнений принято, что ось q опережает ось d. Все параметры роторных цепей приведены к числу фаз и витков обмотки статора. Постоянный магнит заменен одновитковым контуром без потерь, включенным на источник постоянного тока. Величина ε_0 в уравнениях (15.11) характеризует собой потокосцепление поля постоянных магнитов с обмоткой статора, численно равное в относительных единицах ЭДС холостого хода.

При отсутствии возбуждения со стороны ротора ($\varepsilon_0=0$) уравнения (15.10)—(15.13) представляют собой систему дифференциальных уравнений СРД.

Известно [5], что при симметричной системе напряжений питания составляющие u_d и u_q могут быть представлены как

$$u_d=-\sin\theta_U;\quad u_q=\cos\theta_U,$$

где θ_U — угол между поперечной осью ротора и вектором напряжения:

$$\theta_U=\int_0^t (1-\omega_R)\,dt+\theta_{U0}. \tag{15.14}$$

При исследовании двигательного режима работы машины угол θ_U принимается положительным, когда вектор напряжения питания опережает ось q ротора. Используя уравнение (15.14), можно легко установить связь между углом нагрузки и угловой скоростью ротора:

$$\omega_R=1-d\theta_U/dt. \tag{15.15}$$

В большинстве случаев значения токов в эквивалентных обмотках ротора интереса не представляют. Для уменьшения числа решающих блоков и повышения устойчивости модели эти токи можно исключить из рассмотрения с помощью уравнений (15.10), (15.11). Тогда система дифференциальных уравнений СДПМ, приведенная к удобному для моделирования виду, запишется следующим образом:

$$\left.\begin{aligned}
&d\psi_d/dt=-\sin\theta_U+\omega_R\psi_q-a_1 i_d;\\
&d\psi_q/dt=\cos\theta_U-\omega_R\psi_d-a_1 i_q;\\
&d\psi_D/dt=a_2 i_d-a_3\psi_D+a_3\varepsilon_0;\\
&d\psi_Q/dt=a_4 i_q-a_5\psi_Q;\\
&i_d=a_6\psi_d-a_7\psi_D-a_8\varepsilon_0;\\
&i_q=a_9\psi_q-a_{10}\psi_Q;\\
&d\omega_R/dt=a_{11}(\psi_d i_q-\psi_q i_d-M_{\text{нагр}});\\
&d\theta_U/dt=1-\omega_R.
\end{aligned}\right\} \tag{15.16}$$

Здесь коэффициенты при переменных

$$\left.\begin{aligned} &a_1=r_S;\ a_2=r_D x_{ad}/x_D;\ a_3=r_D/x_D;\ a_4=r_Q x_{aq}/x_Q;\\ &a_5=r_Q/x_Q;\ a_6=x_D/\left(x_d x_D-x_{ad}^2\right);\ a_7=x_{ad}/\left(x_d x_D-x_{ad}^2\right);\\ &a_8=(x_D-x_{ad})/\left(x_d x_D-x_{ad}^2\right);\ a_9=x_Q/\left(x_q x_Q-x_{aq}^2\right);\\ &a_{10}=x_{aq}/\left(x_q x_Q-x_{aq}^2\right);\ a_{11}=1/J. \end{aligned}\right\} \quad (15.17)$$

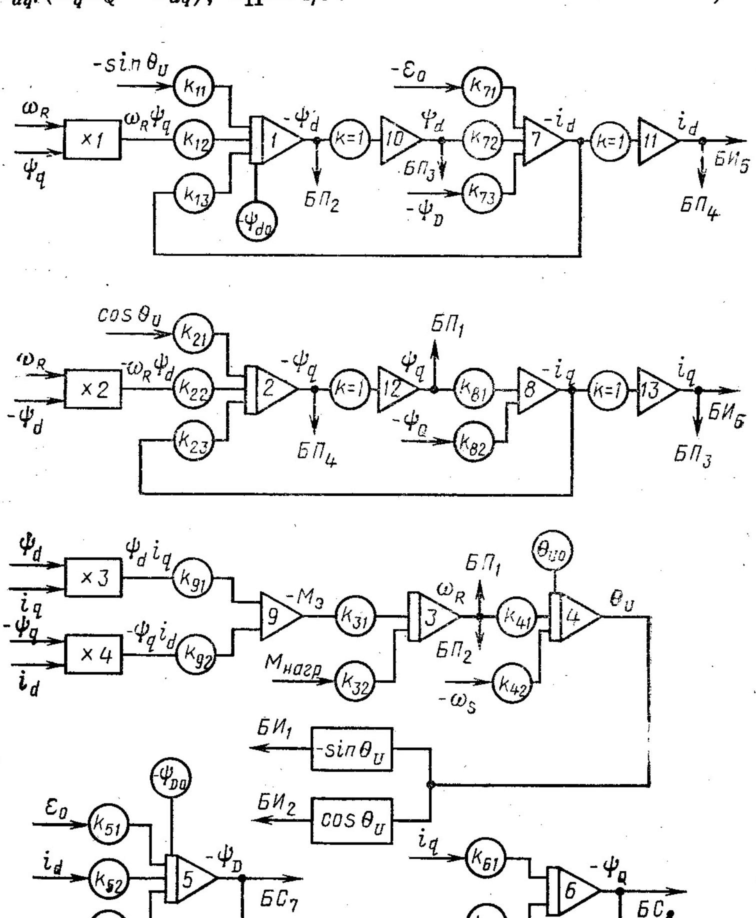


Рис. 15.4. Схема моделирования уравнений синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов

На основании системы дифференциальных уравнений (15.16) составляется схема моделирования синхронного двигателя (рис. 15.4), содержащая четыре блока произведения БП, два функцио-

нальных блока, шесть интегросумматоров БИ, три сумматора БС и четыре инвертора.

Цель работы — исследовать различные динамические и статические характеристики синхронных двигателей с постоянными магнитами, а при $\varepsilon_0 = 0$ — и синхронных реактивных двигателей.

ПРОГРАММА РАБОТЫ

1. Набрать на АВМ модель системы дифференциальных уравнений синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов.
2. Осуществить пуск двигателя без нагрузки и снять рабочие характеристики СДПМ.
3. Исследовать синхронизирующие свойства синхронных двигателей: а) определить моменты входа в синхронизм и выхода из синхронизма СДПМ и СРД; б) исследовать влияние степени возбужденности двигателя на его синхронизирующие свойства.
4. Снять рабочие характеристики СРД.

ПОЯСНЕНИЯ И УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

В качестве базового двигателя удобно принять синхронный двигатель с постоянными магнитами. Ознакомившись с его паспортными данными, следует рассчитать базисные величины (см. табл. 14.1), относительные значения параметров и по (15.17) — коэффициенты при переменных в преобразованной системе уравнений. Абсолютные значения параметров должны быть заранее известны.

Набор модели. Для расчета коэффициентов передач решающих блоков необходимо выбрать масштабы переменных. Для двигателей малой мощности рекомендуются следующие масштабы: напряжения и тригонометрических функций $m_U = m_{\sin} = m_{\cos} = 50$ В/ед.; тока $m_i = 20$ В/ед.; потокосцепления $m_\psi = 50$ В/ед.; угловой скорости $m_\omega = 80$ В/ед.; момента $m_M = 40$ В/ед.; времени $m_t = 0{,}5$; угла нагрузки $m_\theta = 15{,}9$ В/ед. По выбранным масштабам, используя формулы (13.8)—(13.11), рассчитываются коэффициенты передач решающих блоков (табл. 15.3).

Для повышения точности модели тригонометрические функции воспроизводятся на нелинейных блоках лишь в диапазоне изменения углов нагрузки от 0 до 2π. Карта настройки функции $\cos\theta_U$ приведена в табл. 15.2, карта настройки функции $-\sin\theta_U$ — в табл. 15.4; погрешность воспроизведения функций менее 2%. Расширение пределов изменения угла нагрузки обеспечивается устройством периодизации угла, собираемым на выходе интегросумматора *4* по схеме, приведенной на рис. 15.3.

В процессе вхождения синхронных двигателей в синхронизм при больших моментах инерции нагрузки и малой крутизне пусковой механической характеристики частота вращения ротора может длительно превышать синхронную частоту вращения поля якоря.

Таблица 15.3

Коэффициенты передач	$k_{11}=k_{21}$	$k_{12}=k_{22}$	$k_{13}=k_{23}$	$k_{31}=k_{32}$	$k_{41}=k_{42}$	k_{51}	k_{52}	k_{53}
Расчетные формулы	$\frac{m_\psi}{m_U m_t}$	$\frac{100}{m_\omega m_t}$	$\frac{a_1 m_\psi}{m_i m_t}$	$\frac{a_{11} m_\omega}{m_M m_t}$	$\frac{m_\theta}{m_\omega m_t}$	$\frac{a_3 m_\psi}{m_U m_t}$	$\frac{a_2 m_\psi}{m_i m_t}$	$\frac{a_3}{m_t}$

Продолжение табл. 15.3

Коэффициенты передач	k_{61}	k_{62}	k_{71}	k_{72}	k_{73}	k_{81}	k_{82}	$k_{91}=k_{92}$
Расчетные формулы	$\frac{a_4 m_\psi}{m_i m_t}$	$\frac{a_5}{m_t}$	$\frac{a_8 m_i}{m_U}$	$\frac{a_6 m_i}{m_\psi}$	$\frac{a_7 m_i}{m_\psi}$	$\frac{a_9 m_i}{m_\psi}$	$\frac{a_{10} m_i}{m_\psi}$	$\frac{100 m_M}{m_\psi m_i}$

Таблица 15.4

Квадранты	IV	I		I		IV		IV	
Диоды	1	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_{отп}$, В	0	13,0	22,2	27,8	37,0	63,0	72,2	77,8	87,0
$U_{вх}$, θ_U, В	13,0	22,2	27,8	37,0	63,0	72,2	77,8	87,0	100
$U_{вых}$, $-\sin\theta_U$, В	−37,5	−50,0	−50,0	−37,5	37,5	50,0	50,0	37,5	0

В этом случае угол нагрузки может принимать отрицательные значения. Для учета этого явления следовало бы дополнить схему моделирования еще двумя нелинейными блоками, воспроизводящими синусно-косинусные зависимости отрицательного агрумента. Однако в современных синхронных микродвигателях, имеющих на роторе практически полную демпферную (пусковую) клетку, это явление возникает крайне редко. Кроме того, оно может быть устранено, если осуществлять пуск двигателя с определенной нагрузкой.

Осуществив настройку коэффициентов передач и нелинейных блоков, приступают к набору модели в соответствии со схемой, приведенной на рис. 15.4. На выходе интегросумматоров *1* и *5* устанавливаются начальные условия (В) $-\psi_{d0}=-\psi_{D0}=m_\psi\varepsilon_0$.

На входы сумматора *7* и интегросумматора *5* через сопротивления R_{71} и R_{51} подается напряжение $U_{51}=-U_{71}=m_U\varepsilon_0$. На вход интегросумматора *4* через сопротивление R_{42} подается напряжение $U_{42}=$ $=-80$ В, соответствующее синхронной угловой скорости поля якоря. Момент нагрузки устанавливается на входе сопротивления R_{32}* с помощью делителя эталонного напряжения. О правильности

* В схеме моделирования (рис. 15.4) сопротивлению R_{32} соответствует коэффициент передачи k_{32}.

задания начальных условий можно судить по току i_d, значение которого до запуска модели должно быть равно нулю.

Рабочие характеристики СДПМ. Эти характеристики снимаются в диапазоне изменения нагрузки от нуля до момента выхода из синхронизма. Значение нагрузки устанавливается делителем эталонного напряжения. Показания приборов фиксируются после того, как частота вращения ротора достигнет синхронной (рис. 15.5). При $M_{нагр}>M_{вых}$ двигатель выпадает из синхронизма и переходит в асинхронный режим ($\omega_R<\omega_c$). Момент выхода характеризует перегрузочную способность двигателя.

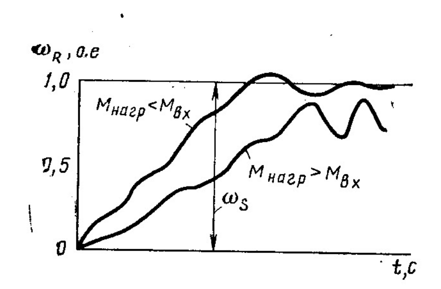


Рис. 15.5. Осциллограммы угловой скорости ротора СДПМ при пуске

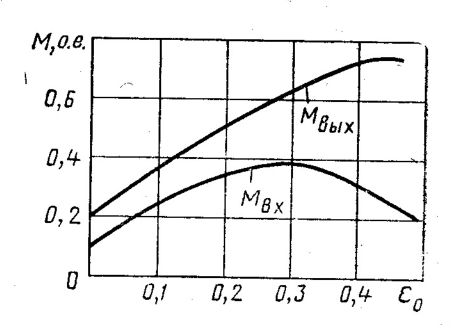


Рис. 15.6. Кривые, показывающие влияние степени возбужденности на синхрониризующие свойства СДПМ

По измеренным значениям $M_{нагр}$, i_d, i_q и θ_U рассчитываются реальные переменные [см. (14.2)]. Рабочие характеристики определяются по следующим формулам: потребляемый ток (А) $I_S=\sqrt{i_d^2+i_q^2}/\sqrt{2}$; потребляемая мощность (Вт) $P_S=3U_б(i_q\cos\theta_U-i_d\sin\theta_U)/2$; коэффициент мощности $\cos\varphi=\sqrt{2}P_S/(3U_бI_S)$; полезная мощность (Вт), $P_R=M_{нагр}\omega_б/p$; КПД $\eta=P_R/P_S$. По расчетным данным строятся рабочие характеристики P_S; I_S; $\cos\varphi$; η в зависимости от P_R и угловая характеристика $M_{нагр}=f(\theta_U)$ двигателя.

Исследование синхронизирующих свойств. Синхронизирующие свойства синхронных двигателей характеризуются моментом входа $M_{вх}$ (см. § 15.1), который рекомендуется определять из режима ресинхронизации. Для этого осуществляют пуск двигателя без нагрузки и, после того как частота вращения ротора достигнет синхронной, нагружают двигатель до момента, при котором он выходит из синхронизма. При этом определяют максимальный синхронизирующий момент $M_{вых}$. Затем, уменьшая момент сопротивления, определяют два его значения, незначительно отличающихся и удовлетворяющих следующему условию: при меньшем значении момента нагрузки двигатель втягивается в синхронизм ($\omega_R=\omega_c$), а при большем — продолжает работать в асинхронном режиме ($\omega_R<\omega_c$). За момент входа принимается первое значение момента нагрузки.

Схема моделирования (см. рис. 15.4) позволяет исследовать влияние степени возбужденности СДПМ на его синхронизирующие свойства. Для этого следует лишь изменить начальные условия и входные напряжения, зависящие от ε_0. При нулевых начальных условиях ($\varepsilon_0=0$) получают модель синхронного реактивного двигателя. Моменты входа и выхода СРД определяют по изложенной методике. По данным опытов сравнивают синхронизирующие свойства СДПМ и СРД и строят зависимости $M_{вых}$ и $M_{вх}$ от ε_0 для СДПМ. Такие зависимости для двигателя мощностью 25 Вт приведены на рис. 15.6.

Рабочие характеристики СРД. Обычно в синхронных реактивных двигателях индуктивное сопротивление по продольной оси превышает индуктивное сопротивление по поперечной ($x_d > x_q$). В данной работе исследуется СРД с параметрами невозбужденного СДПМ, у которого $x_d < x_q$. Это обстоятельство не имеет принципиального значения, поскольку выходные характеристики СРД определяются разностью индуктивных сопротивлений по осям d, q, а конечные результаты не зависят от наименования осей. Однако следует иметь в виду, что при $x_d < x_q$ рабочие характеристики СРД находятся в зоне значений углов нагрузки $\theta_U > \pi/2$. Рабочие характеристики СРД снимаются по методике, изложенной для СДПМ.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Поскольку номинальный момент синхронных микродвигателей определяется в основном моментом входа, целесообразно сравнивать рабочие свойства СРД и СДПМ при $M_{нагр} = M_{вх}$. Как правило, СДПМ обладают более высокими энергетическими показателями ($\cos\varphi$, η). Однако с уменьшением мощности это различие становится менее значительным. Объясняется это тем, что для обеспечения надежного пуска СДПМ малой мощности выполняются с низкой степенью возбужденности.

Синхронизирующие свойства синхронных двигателей определяются соотношением всех параметров, входящих в систему дифференциальных уравнений. Момент входа в значительной мере зависит от момента инерции нагрузки, так как с увеличением его растет кинетическая энергия вращающихся масс, препятствующая процессу синхронизации. Параметры роторных цепей определяют вращающий момент в асинхронном режиме, который не только обеспечивает пуск двигателей, но и участвует в работе синхронизирующих сил, способствуя процессу синхронизации.

В двигателях малой мощности на синхронизирующие свойства существенно влияет активное сопротивление обмотки якоря. С ростом сопротивления r_S наблюдается значительное снижение момента входа не только за счет уменьшения максимального синхронизирующего момента, но и за счет увеличения тормозного момента, который прямо пропорционален r_S (см. § 6.1).

В двигателях с постоянными магнитами синхронизирующие свойства в значительной мере определяются степенью возбужден-

ности двигателя. В двигателях малой мощности имеется определенная величина ε_0, при которой обеспечиваются наилучшие условия синхронизации. Дальнейшее увеличение степени возбужденности приводит к снижению момента входа, несмотря на то что момент выхода продолжает возрастать ($M_{вых} \equiv \varepsilon_0$). Объясняется это тем, что тормозной момент в СДПМ пропорционален квадрату степени возбужденности ($M_т \equiv \varepsilon_0^2$).

Вопросы для самопроверки

1. Какие изменения необходимо произвести в схеме моделирования (см. рис. 15.4) для получения модели синхронного реактивного двигателя?
2. Как воспроизводятся на АВМ тригонометрические функции угла нагрузки?
3. Объясните принцип действия устройства периодизации угла нагрузки.
4. Как проверить правильность задания начальных условий?
5. Какова методика определения момента входа в синхронизм?
6. По каким переменным можно определить режим работы синхронного двигателя?
7. Объясните различие индуктивных сопротивлений по осям d и q в СДПМ и СРД.
8. В каком диапазоне углов нагрузки находятся рабочие характеристики СДПМ и СРД?
9. Какая величина характеризует перегрузочную способность синхронных двигателей? Как она определяется?
10. Как связаны реальные переменные с переменными модели?
11. Какое влияние на синхронизирующие свойства оказывает степень возбуждения двигателя?
12. Как зависит момент входа от момента инерции нагрузки?
13. Какое влияние на момент входа оказывает активное сопротивление обмотки статора?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Испытание электрических микромашин/*Астахов Н. В., Крайз Б. Л., Лопухина Е. М.* и др. М., 1973.

2. *Юферов Ф. М.* Электрические машины автоматических устройств. М., 1976.

3. *Лопухина Е. М., Семенчуков Г. А.* Проектирование асинхронных микродвигателей с применением ЭВМ. М., 1980.

4. *Копылов И. П.* Применение вычислительных машин в инженерно-экономических расчетах. М., 1980.

5. *Иванов-Смоленский А. В.* Электрические машины. М., 1980.

6. *Брускин Д. Э., Зорохович А. Е., Хвостов В. С.* Электрические машины и микромашины. М., 1981.

7. *Осин И. Л., Колесников В. П., Юферов Ф. М.* Синхронные микродвигатели с постоянными магнитами. М., 1976.

8. Микродвигатели для систем автоматики/Под ред. *Э. А. Лодочникова, Ф. М. Юферова.* М., 1969.

9. *Хрущев В. В.* Электрические микромашины автоматических устройств. Л., 1976.

10. *Лопухина Е. М., Сомихина Г. С.* Асинхронные микромашины с полым ротором. М., 1967.

11. *Лопухина Е. М., Сомихина Г. С.* Проектирование асинхронных микромашин с полым ротором. М., 1968.

12. *Каасик П. Ю., Несговорова Е. Д., Борисов А. П.* Расчет управляемых короткозамкнутых микродвигателей. Л., 1972.

13. *Кононенко Е. В.* Синхронные реактивные машины. М., 1970.

14. *Ивоботенко Б. А., Ильинский Н. Ф., Копылов И. П.* Применение планирования эксперимента в задачах электромеханики. М., 1975.

15. *Копылов И. П.* Электромеханические преобразователи энергии. М., 1973.

16. *Сипайлов Г. А., Лоос А. В.* Математическое моделирование электрических машин. М., 1980.

17. Электротехнический справочник. М. — Л., т. III, кн. 2, 1981.

18. *Потапов Л. А., Юферов Ф. М.* Измерение вращающих моментов и скоростей вращения микроэлектродвигателей. М., 1974.

19. *Волков Л. К., Ковалев Р. Н., Никифорова Г. Н.* Вибрации и шум электрических машин малой мощности. Л., 1979.

20. *Адаменко А. И., Кисленко В. И.* Преобразование однофазного тока в трехфазный. Киев, 1971.

21. ГОСТ 16264—78. Электродвигатели малой мощности общего назначения. Общие технические условия.

22. ОСТ 16.0.800.498—77. Комплексная система управления качеством продукции. Электродвигатели малой мощности. Оценка уровня качества.

23. ГОСТ 23941—79 (СТ СЭВ 541—77). Шум. Методы определения шумовых характеристик. Общие требования.

24. ГОСТ 20815—80. Машины электрические вращающиеся. Вибрации. Допустимые значения и методы испытаний.

25. *Кацман М. М., Юферов Ф. М.* Электрические машины автоматических систем. М., 1979.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Предисловие 3
Введение 4

РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ
МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ МИКРОМАШИН 6

Глава 1. **Измерение электрических величин** 6

§ 1.1. **Измерение** тока, напряжения и мощности 6
§ 1.2. **Снятие кривых** напряжения и тока. Оценка характера поля 9
§ 1.3. **Измерение** активного сопротивления и превышения температуры обмоток 10

Глава 2. **Измерение неэлектрических величин** 12

§ 2.1. Классификация методов измерения вращающих моментов 12
§ 2.2. **Тормоза-моментомеры** для измерения вращающих моментов 14
§ 2.3. **Измерение** частоты вращения 24

Глава 3. **Измерение уровня звука, вибраций и радиопомех** 31

§ 3.1. Измерение уровня звука 31
§ 3.2. Измерение вибраций 36
§ 3.3. Измерение радиопомех 41

Глава 4. **Автоматизация испытаний микромашин** 43

РАЗДЕЛ ВТОРОЙ
ИСПЫТАНИЕ МИКРОДВИГАТЕЛЕЙ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ . . . 48

Глава 5. **Испытание асинхронных микродвигателей** 48

§ 5.1. **Универсальный** асинхронный двигатель 48
§ 5.2. **Однофазный** асинхронный двигатель с экранированными полюсами 63
§ 5.3. **Асинхронный** конденсаторный двигатель 75

Глава 6. **Испытание синхронных микродвигателей** 87

§ 6.1. **Синхронный** двигатель с постоянными магнитами 87
§ 6.2. **Синхронный** реактивный двигатель 96
§ 6.3. **Синхронный** гистерезисный двигатель 103

Глава 7. **Испытание универсального коллекторного микродвигателя** . . . 110

РАЗДЕЛ ТРЕТИЙ
ИСПЫТАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МИКРОМАШИН АВТОМАТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ 120

Глава 8. **Испытание исполнительных микродвигателей** 120

§ 8.1. Исполнительный асинхронный двигатель 120
§ 8.2. Исполнительный двигатель постоянного тока 136

Глава 9. **Испытание информационных электрических микромашин** 146

§ 9.1. **Асинхронный** тахогенератор (ТГ) 146
§ 9.2. Тахогенератор постоянного тока 154
§ 9.3. **Сельсины** 160
§ 9.4. **Поворотный** трансформатор 177

РАЗДЕЛ ЧЕТВЕРТЫЙ
ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МИКРОМАШИН 190

Глава 10. **Опытное определение параметров микромашин переменного тока** 190

§ 10.1. Определение параметров асинхронной машины при однофазном питании 190

Стр.

§ 10.2. Опытное определение параметров синхронных двигателей 197
§ 10.3. Определение электромеханической постоянной времени исполнительных микродвигателей 203
Глава 11. **Математическое моделирование двухфазных асинхронных микромашин на расчетном столе переменного тока** 208
§ 11.1. Определение выходных характеристик 208
§ 11.2. Применение метода планирования эксперимента для исследования выходных показателей 216
Глава 12. **Исследование уровня звука, вибрации и радиопомех в электрических микромашинах** 221
§ 12.1. Определение уровня вибрации и звука в микромашинах 221
§ 12.2. Исследование радиопомех двигателя постоянного тока 229

РАЗДЕЛ ПЯТЫЙ

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МИКРОМАШИН НА АВМ 235

Глава 13. **Методика моделирования микромашин на АВМ** 235

Глава 14. **Исследование на АВМ асинхронных микродвигателей** 241

§ 14.1. Асинхронный трехфазный двигатель с короткозамкнутым ротором 241
§ 14.2. Асинхронный конденсаторный двигатель 248
Глава 15. **Исследование на АВМ синхронных микродвигателей** 255
§ 15.1. Определение момента входа в синхронизм синхронных двигателей с асинхронным пуском 255
§ 15.2. Сравнение пусковых, синхронизирующих и рабочих свойств синхронных двигателей 262
Список литературы 270

Николай Владимирович Астахов, Елена Моисеевна Лопухина,
Виктор Тихонович Медведев, Игорь Львович Осин,
Геннадий Алексеевич Семенчуков, Галина Сергеевна Сомихина,
Алексей Яковлевич Титунин, Федор Михайлович Юферов

ИСПЫТАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МИКРОМАШИН

Заведующая редакцией Н. И. Хрусталева
Редактор С. М. Оводова
Художник В. Н. Хомяков
Художественный редактор Л. К. Громова
Технический редактор А. К. Нестерова
Корректор Г. И. Кострикова

ИБ № 4377

Изд. № Стд — 415. Сдано в набор 27.07.84. Подп. в печать 22.11.84. **Т-21181.**
Формат 60×90¹/₁₆. Бум. тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать **высокая.**
Объем 17 усл. печ. л. 17 усл. кр.-отт. 17,98 уч.-изд. л. **Тираж 11 000 экз.**
Зак. № 761. Цена 90 коп.
Издательство «Высшая школа», 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., д. 29/14
Московская типография № 8 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли,
101898, Москва, Центр, Хохловский пер., 7.